

OUTIL DE VISUALISATION DES FRACTURES DU TIBIA DISTAL EN RÉALITÉ VIRTUELLE

par

Léa VONG

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE LA MAÎTRISE
AVEC MÉMOIRE EN GÉNIE DES TECHNOLOGIES DE LA SANTÉ
M. Sc. A

MONTREAL, LE 09 AVRIL 2025

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Léa Vong, 2025



Cette licence [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/) signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY
CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ
PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Simon Drouin, directeur de mémoire
Département de génie logiciel et des TI à l'École de technologie supérieure

Mme Nicola Hagemeister, codirectrice de mémoire
Département de génie des systèmes à l'École de technologie supérieure

M. Gabriel Larose, codirecteur de mémoire
Département Orthopédie, Université du Manitoba

Mme Alexandra Nemery, président du jury
Département de design à l'École de technologie supérieure

M. David Labbé, membre du jury
Département de génie logiciel et des TI à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 25 MARS 2025

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Pour commencer, je tiens à exprimer ma gratitude à toutes les personnes qui m'ont encouragé de près ou de loin dans l'aventure qu'à représenter ce projet de recherche.

Je souhaite remercier Simon Drouin, mon directeur de mémoire, pour sa supervision tout au long de ce projet. Merci de m'avoir accepté dans ton laboratoire, de m'avoir guidé pendant ces deux dernières années et surtout d'avoir cru en mes capacités pour réaliser ce projet de recherche. Ton expertise et ton ouverture d'esprit ont été une aide précieuse dans la construction de ce projet. Merci de m'avoir fait découvrir le monde de la recherche, et j'espère avoir l'occasion de collaborer de nouveau avec toi !

Un grand merci également à Nicola Hagemeister, ma co-directrice de recherche, pour m'avoir aidé à faire avancer mon projet et pour tout le soutien dont j'avais besoin pendant mes moments de doute. Tu as souvent eu les bons mots quand il le fallait pour me faire réussir et me faire oublier mes incertitudes. Je te remercie d'avoir accepté de co-superviser mon projet de mémoire et de m'avoir fait confiance.

Je tiens aussi à remercier Gabriel Larose pour son implication dans ce projet, tout d'abord pour la naissance de ce projet de recherche mais également d'avoir toujours été disponible pour répondre à mes questions, malgré la distance entre nos deux provinces. Merci pour ton accueil lors de mon déplacement à Winnipeg et pour ton expertise qui m'a beaucoup appris. J'ai été heureuse d'avoir pu collaborer avec toi !

Je remercie mon école d'ingénieur ISIS qui m'a permis de venir faire un double diplôme à l'ÉTS.

Je remercie toutes les personnes que j'ai pu rencontrer au LIO, qui m'ont introduit dans le laboratoire et le monde de la recherche. Merci à Andrey qui m'a aidé sur la programmation de mon outil et pour ses conseils. De plus, je souhaite remercier Alice et Camille qui ont toujours

été réactives pour les questions de gestion de la qualité au sein du labo ; et Rémi et Margaux qui m'ont aidé pendant plusieurs mois dans les démarches d'approbation éthiques liées à mon projet. Un grand merci particulier à Tina, Alejandro et Naomi pour votre présence au laboratoire, sans qui les journées n'auraient pas été pareil. Nos échanges ont rendu l'élaboration de ce projet agréable.

Je souhaite remercier tous mes amis qui m'ont encouragé pendant ces deux dernières années. Je pense évidemment à mes amis d'ISIS avec qui j'ai vécu l'aventure montréalaise, mais aussi aux différentes personnes que j'ai eu l'occasion de rencontrer notamment dans l'Éxutoire et MusiquETS. Merci sincèrement à mon groupe d'amis (aigris) qui ont écouté mes doutes et mes plaintes et m'ont fait sortir de ma zone de confort pour me soutenir.

Enfin, merci à mes parents qui m'ont toujours soutenu dans mes choix d'études, malgré la distance de plus en plus grande au fil des années.

OUTIL DE VISUALISATION DES FRACTURES DU TIBIA DISTAL EN RÉALITÉ VIRTUELLE

Léa VONG

RÉSUMÉ

Les fractures intra-articulaires du tibia distal sont difficiles à traiter en raison de leur complexité. Pour les opérer, une réduction de fracture doit être réalisée afin de reconstruire la surface articulaire et de maintenir l'alignement des fragments osseux. Les enseignements des réductions de fracture sont découpés en deux parties. Pour enseigner la partie théorique, les chirurgiens utilisent des outils de visualisation sur ordinateur comme une visionneuse PACS (Picture Archiving and Communication System) pour afficher des tomodensitométries de fracture et s'en servir comme support de formation. Bien que des outils de formation chirurgicales ont été développés pour permettre aux résidents de s'entraîner dans un environnement sain et contrôlé sans risquer la sécurité du patient, il n'existe pas d'outil dédié aux fractures du tibia distal.

Le but de ce projet de recherche est d'évaluer la valeur ajoutée de la réalité virtuelle pour la formation de la chirurgie de réduction des fractures du tibia distal. Cet objectif est réalisé par la comparaison de deux outils : une visualisation en réalité virtuelle et des images tomodensitométriques examinées sur un système PACS standard. Un outil de visualisation des fractures du tibia distal a été développé en réalité virtuelle. Afin de valider l'intérêt d'utilisation de cet outil, une étude usager a été menée auprès d'un chirurgien orthopédiste collaborant au projet. Le plan expérimental est basé sur un protocole de réflexion à haute voix afin de comparer les processus réalisés. Le chirurgien a réalisé un enseignement de réduction de fracture du tibia sur six cas d'étude en manipulant les deux modes de visualisation et des enregistrements audios et vidéos ont été effectués pour réaliser les comparaisons. Les résultats indiquent que la réalité virtuelle n'est pas moins performante qu'un outil de visualisation standard et qu'il offre un intérêt d'utilisation pour la visualisation des fractures du tibia distal. La réalité virtuelle permet une interaction plus simple, ainsi qu'une explication plus visuelle. En outre, la réalité virtuelle n'introduit pas de contrainte supplémentaire en termes de durée d'utilisation par rapport à une méthode plus conventionnelle de formation.

Mots-clés : Réalité virtuelle, outil de visualisation, fracture du tibia distal

DISTAL TIBIA FRACTURE VIRTUAL REALITY VISUALIZATION TOOL

Léa VONG

ABSTRACT

Intra-articular fractures of the distal tibia are difficult to treat due to their complexity. To operate on them, a fracture reduction must be performed to reconstruct the articular surface and maintain the alignment of the bone fragments. Fracture reduction courses are divided into two parts. To teach the theoretical part, surgeons use computer-based visualization tools such as a PACS (Picture Archiving and Communication System) viewer to display fracture CT scans and use them as training aids. Although surgical training tools have been developed to enable residents to train in a safe, controlled environment without risking patient safety, there is no tool dedicated to distal tibia fractures.

The aim of this research project is to assess the added value of virtual reality for training in distal tibia fracture reduction surgery. This is achieved by comparing two tools: a virtual reality visualization and CT images reviewed on a standard PACS system. A tool for visualizing distal tibial fractures has been developed in virtual reality. In order to validate the use of this tool, a user study was carried out with an orthopedic surgeon collaborating on the project. The experimental design was based on a think-aloud protocol to compare the processes involved. The surgeon taught six cases of tibia fracture reduction using both visualization modes, and audio and video recordings were made for comparison. The results show that virtual reality is no less effective than a standard visualization tool, and that it is well-suited to the visualization of distal tibia fractures. Virtual reality enables simpler interaction, as well as a more visual explanation. In addition, virtual reality does not introduce any additional constraints in terms of duration of use compared with a more conventional training method.

Key words: Virtual reality, visualization tool, distal tibia fracture

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE.....	5
1.1 La cheville.....	5
1.1.1 Anatomie et physiologie de la cheville	5
1.1.2 Fracture du tibia distal	7
1.2 Réduction des fractures.....	8
1.3 Outil de formation chirurgicale.....	11
1.4 Usage de la réalité virtuelle dans la chirurgie orthopédique.....	15
1.5 Protocole « thinking-aloud ».....	17
1.6 Questionnaires d'utilisabilité standard.....	17
CHAPITRE 2 PROBLÉMATIQUE, OBJECTIFS ET HYPOTHÈSES.....	19
CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE.....	21
3.1 Introduction à la méthodologie	21
3.2 Développement de l'outil en réalité virtuelle.....	21
3.2.1 Jeux de données	21
3.2.2 Modèles tridimensionnels des fractures du tibia distal	22
3.2.3 Outil de visualisation en réalité virtuelle	23
3.2.3.1 Interface et environnement virtuel	24
3.2.3.2 Modes d'interaction	24
3.3 Étude usager.....	26
3.3.1 Participant	26
3.3.2 Déroulement de l'étude usager	26
3.3.2.1 Première partie : Réduction de fracture avec un système PACS standard.....	27
3.3.2.2 Deuxième partie : Réduction de fracture avec une visualisation en réalité virtuelle	27
3.4 Pré-traitement des données	30
3.5 Tests statistiques	31
CHAPITRE 4 RÉSULTATS.....	33
4.1 Analyses de la durée des explications.....	33
4.1.1 Durée des enregistrements	33
4.1.2 Durée des enregistrements sans mouvement	33
4.2 Analyse des transcriptions	34
4.2.1 Comparaisons des transcriptions.....	34
4.2.2 Différences constatées entre méthode conventionnelle et réalité virtuelle	35
4.2.3 Nombre de mots.....	35

4.3	Analyse visuelle des enregistrements vidéo	37
4.3.1	Durée des catégories	37
4.3.2	Actions dans chaque catégorie.....	38
4.3.2.1	Décomposition des actions	38
4.3.2.2	Comparaison des durées des catégories avec mouvement en réalité virtuelle et sans mouvement en réalité virtuelle	41
4.3.2.3	Comparaison des actions pour chaque catégorie	42
4.4	Analyse des questionnaires d'utilisabilité standard	44
4.4.1	System Usability Scale	44
4.4.2	NASA-TLX.....	45
CHAPITRE 5 DISCUSSION		47
5.1	Discussion globale sur les enregistrements.....	47
5.2	Discussion sur l'analyse des transcriptions.....	48
5.3	Discussion sur l'analyse vidéo.....	49
5.4	Discussion sur les questionnaires d'utilisabilité standard.....	50
5.5	Discussion sur l'outil développé	51
CHAPITRE 6 LIMITES.....		53
CONCLUSION.....		55
RECOMMANDATIONS		57
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES		59

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 4.1	Durée des explications pour chaque cas exprimé en secondes33
Tableau 4.2	Durée des explications pour chaque cas avec les données en réalité virtuelle réajustées, exprimée en secondes34
Tableau 4.3	Nombre de mots employés à chaque phase d'explication pour chaque outil36
Tableau 4.4	Durée des explications dans chaque phase pour les deux outils38
Tableau 4.5	Actions labélisées pour chaque outil.....39
Tableau 4.6	Durées des explications avec les données réajustées42
Tableau 4.7	Nombres et durées des actions pour chaque catégorie.....43
Tableau 4.8	SUS : Score de chaque questionnaire répondu par le participant44
Tableau 4.9	NASA-TLX : Réponses du questionnaire par le participant pour les deux outils.....45

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Représentation du tibia et de la fibula Tiré de Marieb & Hoehn (2010)6
Figure 1.2	Illustration montrant les trois os qui forment l'articulation de la cheville : le tibia, la fibula et le talus Tiré de Ankle Fractures (Broken Ankle) - OrthoInfo - AAOS, (s. d.)6
Figure 1.3	Schéma de classification de l'AO/OTA pour les fractures du tibia distal Tiré de Meinberg et al. (2018)8
Figure 1.4	Tomodensitométrie d'une fracture du tibia distal de type 43C dans la classification de l'AO/OTA, dans les trois coupes : axiale, sagittale et coronale.....8
Figure 1.5	Réduction ouverte et fixation interne - Placement des différentes plaques et vis par voie antérolatérale Tiré de ORIF - Plate and Screws through Anterolateral Approach for Complete, Multifragmentary Articular and Metaphyseal Fracture (s. d.)10
Figure 1.6	Radiographie postopératoire d'une fracture du tibia distal Tiré de ORIF - Plate and Screws through Anterolateral Approach for Complete, Multifragmentary Articular and Metaphyseal Fracture (s. d.) .11
Figure 1.7	Interface de la visionneuse PACS avec des images d'une fracture du tibia distal.....12
Figure 3.1	Tomodensitométrie d'une fracture du tibia distal avec la segmentation de l'os cortical, représentation en trois dimensions de la segmentation réalisée en haut à droite.....23
Figure 3.2	Environnement virtuel et visualisation des fractures du tibia distal en réalité virtuelle24
Figure 3.3	Représentation de plusieurs fragments osseux d'un cas étudié, manipulation d'un fragment osseux en réalité virtuelle25
Figure 3.4	Instructions affichées dans le casque de réalité virtuelle avant d'utiliser l'outil28
Figure 3.5	Fenêtre contextuelle contenant la liste de tous les cas d'étude ainsi que d'un exercice d'entraînement.....28

Figure 3.6	Exercice d'entraînement pour comprendre les interactions à réaliser29
Figure 4.1	Découpage vidéo avec mouvement en réalité virtuelle40
Figure 4.2	Légende du découpage vidéo avec mouvement en réalité virtuelle40
Figure 4.3	Découpage vidéo sans mouvement en réalité virtuelle.....41
Figure 5.1	Repère spatiaux dans la vue 3D de 3D Slicer51

INTRODUCTION

Les fractures intra-articulaires du tibia distal sont difficiles à traiter en raison de leur complexité, des défis associés à leur réduction et à la préservation de la fonction articulaire. Elles peuvent survenir lors de traumatismes à haute énergie, comme des accidents de la route ou des chutes, et l'alignement des fragments osseux s'en retrouve perturbé.

La réduction des fractures vise à réaligner les fragments osseux de manière stable, souvent grâce à diverses techniques d'ostéosynthèse. Le choix de la technique dépend de la gravité de la fracture et de l'état des tissus mous. La réduction anatomique et la restauration de la surface articulaire sont essentielles pour maintenir la fonction articulaire et éviter les complications.

La planification de la réduction de fracture, qui inclut l'analyse des lésions des tissus mous, est cruciale pour optimiser les résultats chirurgicaux. L'utilisation d'outils comme les systèmes de visionnage PACS, permettant une étude précise des images radiographiques et tomodensitométriques, joue un rôle clé dans la planification et la réussite de l'opération.

La formation chirurgicale traditionnelle repose sur l'apprentissage pratique en salle d'opération sous supervision, mais elle souffre de plusieurs limitations, notamment un temps d'exposition réduit et un manque de diversité des cas. Les résidents ont souvent peu de temps opératoire et une autonomie limitée, ce qui rend la formation incomplète. Bien que des modèles cadavériques et animaux soient utilisés pour pratiquer certaines compétences, ces méthodes présentent des inconvénients financiers et logistiques. D'autres dispositifs de formation, tels que des modèles de fractures ou des exercices pratiques, ne permettent pas de reproduire certains aspects importants de la chirurgie.

La simulation chirurgicale offre une alternative pour combler ces lacunes, en permettant aux résidents de s'exercer sur des modèles avant d'opérer des patients réels. Elle permet de pratiquer des procédures peu fréquentes, d'améliorer les compétences cognitives et collectives, et de répéter les gestes jusqu'à leur maîtrise. La simulation réduit les risques pour les patients,

améliore l'efficacité des interventions et contribue à une formation plus uniforme et équitable pour les résidents.

Les simulateurs en réalité virtuelle, en particulier, permettent de reproduire des situations cliniques en 3D, facilitant la compréhension des structures osseuses et la manipulation des instruments. Ces simulateurs offrent un environnement sûr pour s'exercer et permettent une évaluation objective des compétences, favorisant ainsi le développement de la conscience visuospatiale et la maîtrise des techniques chirurgicales avant les interventions réelles.

La réalité virtuelle est de plus en plus utilisée dans la formation chirurgicale, notamment pour la chirurgie de la fracture de la hanche, les procédures de base et l'environnement de la salle d'opération. Plusieurs études ont évalué l'efficacité des simulateurs en réalité virtuelle dans ce domaine. Cependant, bien que ces études soulignent les avantages de la réalité virtuelle dans la formation chirurgicale, il n'existe pas d'outils dédiés à la formation sur la réduction des fractures du tibia distal.

Le protocole de réflexion à haute voix consiste à demander aux participants de dire à haute voix leurs pensées pendant qu'ils résolvent un problème ou accomplissent une tâche. Cette méthode permet de capturer les processus cognitifs de l'utilisateur au moment précis où ils réfléchissent. Le protocole aide à créer des modèles de processus cognitifs, facilitant ainsi le développement de solutions à des problèmes complexes.

Les enregistrements verbaux recueillis pendant l'exercice sont transcrits, découpés en segments et classés pour analyser les étapes du processus utilisé par les participants. Chaque segment est étiqueté avec des codes représentant des informations spécifiques. Cette analyse permet de comprendre le déroulement des actions et d'identifier les moments où il y a eu un aller-retour entre les étapes de l'analyse ou un changement de perspective, notamment lors de l'utilisation de la simulation en réalité virtuelle. Les données ainsi recueillies sont utilisées pour améliorer la transition d'un modèle papier à une version informatisée.

Notre étude vise à examiner quel pourront être les avantages potentiels de la réalité virtuelle dans la visualisation des fractures du tibia distal par rapport à une méthode plus conventionnelle.

Le premier chapitre de ce mémoire se compose d'une revue de littérature qui met en contexte l'anatomie de la cheville ainsi que le traumatisme d'intérêt, à savoir les fractures du tibia distal. Il poursuit avec la présentation des outils de formation chirurgicale, et plus particulièrement les simulations effectuées en réalité virtuelle. Ce chapitre termine avec une présentation du protocole à haute voix. Le deuxième chapitre spécifie la problématique, les objectifs et les hypothèses de ce projet. La méthodologie de recherche est détaillée dans le troisième chapitre. Il aborde le développement de l'outil en réalité virtuelle ainsi que la mise en place de l'étude usager. Le quatrième chapitre décrit les résultats obtenus. Le cinquième chapitre aborde la discussion et les travaux futurs avant de conclure.

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTÉRATURE

1.1 La cheville

1.1.1 Anatomie et physiologie de la cheville

La cheville est constituée des segments de la jambe et du pied.

Le squelette de la jambe est composé de deux os parallèles, le tibia et la fibula. Le tibia est un os long caractérisé par deux condyles à son extrémité proximale ; l'extrémité distale s'aplanit là où elle s'articule avec le talus de la cheville et se termine par la malléole médiale et la malléole postérieure. La fibula distale est nommée malléole latérale et est connectée au tibia par la membrane interosseuse de la jambe (syndesmose tibio-fibulaire). Les extrémités de la fibula s'articulent avec les faces externes des épiphyses du tibia et à son extrémité distale et s'articule avec le talus créant une articulation de mortaise. Le tibia transmet le poids du corps du fémur au pied tandis que la fibula sert à stabiliser l'articulation et est le point d'attache de plusieurs muscles. L'articulation tibio-fibulaire de la jambe autorise très peu de mouvement mais octroie une meilleure stabilité et robustesse (Voir Figure 1.1).

Le squelette du pied est composé des os du tarse, des métatarsiens et des phalanges. Le talus est un os du tarse. Il est relié au tibia et à la fibula par l'articulation talo-crurale. Le calcaneus forme le talon et soutient le talus sur sa face supérieure (Voir Figure 1.2).

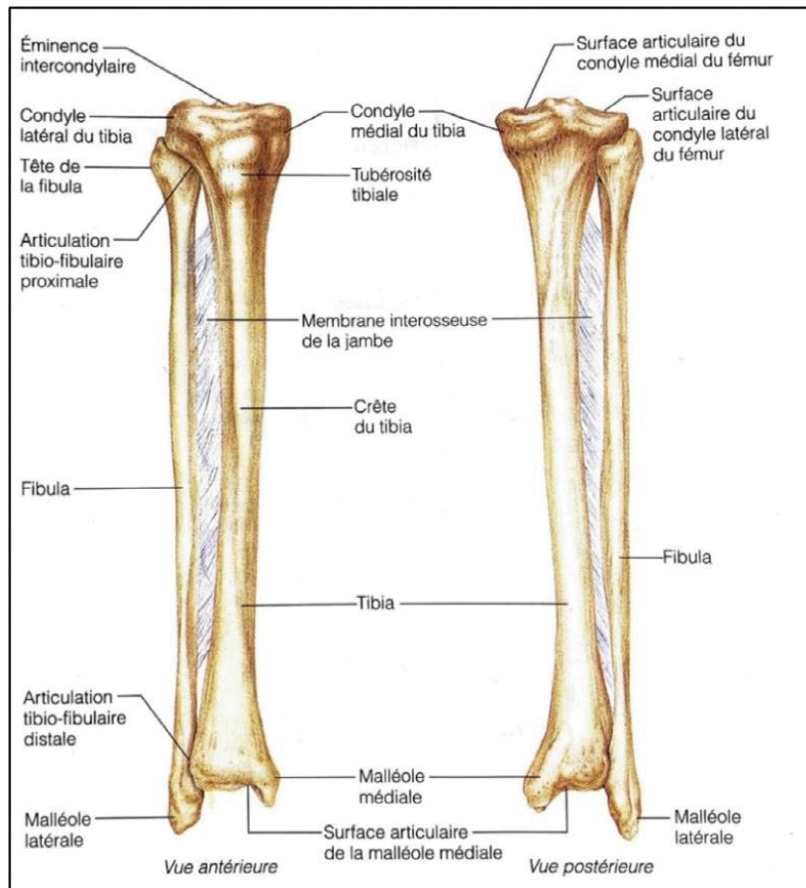


Figure 1.1 Représentation du tibia et de la fibula
Tiré de Marieb & Hoehn (2010)

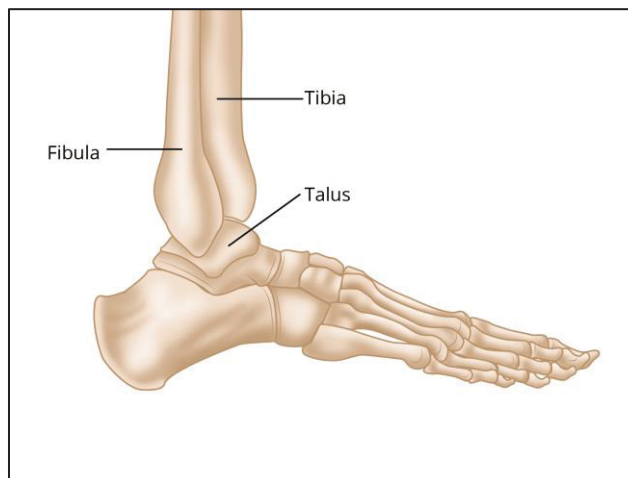


Figure 1.2 Illustration montrant les trois os qui forment l'articulation de la cheville : le tibia, la fibula et le talus
Tiré de Ankle Fractures (Broken Ankle) - OrthoInfo - AAOS, (s. d.)

1.1.2 Fracture du tibia distal

Les fractures complexes du tibia distal représentent moins de 1% des blessures de la partie inférieure du corps humain, mais restent compliquées à traiter pour avoir de bons résultats (Bastias & Lagos, 2020). De manière générale, les fractures comminutives, c'est-à-dire les fractures où l'os est éclaté en plusieurs fragments, sont associées à des traumatismes de haute énergie (Grose et al., 2007; Mair et al., 2021; Paxton et al., 2023). Les fragments osseux perdent leur alignement sous forme de déplacement ou d'angulation (Jiménez-Delgado et al., 2020). De plus, la zone articulaire touchée dépend de la position du pied et de la quantité d'énergie au moment de l'application de la force (Rotter & Gierer, 2017). Ces traumatismes peuvent être causés par un accident de la route ou une chute, avec une charge axiale du membre sur la cheville, avec ou sans charge de torsion. Ces fractures posent problèmes en raison de la complexité pour la réduction de la fracture mais également la difficulté de conserver la fonction de l'articulation (Grose et al., 2007; Mair et al., 2021; Paxton et al., 2023).

Afin de comprendre les fractures, des classifications ont été développées. La classification a pour objectif d'aider les chirurgiens à comprendre et à communiquer sur les fractures de manière standardisée. Elle assure une description précise et cohérente des fractures, ce qui permet une meilleure prise en charge des patients, et facilite la planification des traitements ainsi que la recherche clinique (Meinberg et al., 2018; Müller & Nerlich, 2010).

Le système de classification AO/OTA est un système principalement utilisé pour unifier les différents systèmes de classification existants dans la littérature. Dans cette classification, les fractures du tibia distal sont divisées en trois types principaux : 43A, 43B et 43C. Chaque type est ensuite réparti en sous-groupe, selon l'augmentation de la gravité de la fracture. Les fractures de type A sont des fractures extra-articulaire, tandis que les fractures de type B et C sont considérées comme des fractures du plafond tibial distal (Meinberg et al., 2018; Müller & Nerlich, 2010) (Voir Figure 1.3).

La figure 1.4 montre les images tomodensitométriques d'une fracture du tibia distal classifiés 43C.

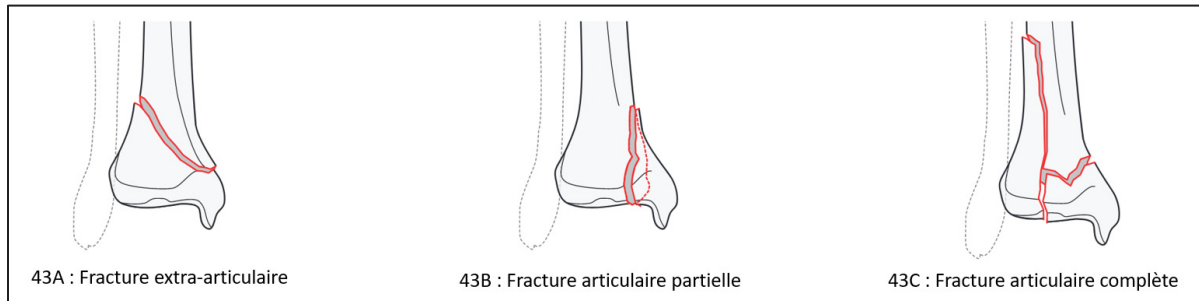


Figure 1.3 Schéma de classification de l'AO/OTA pour les fractures du tibia distal
Tiré de Meinberg et al. (2018)

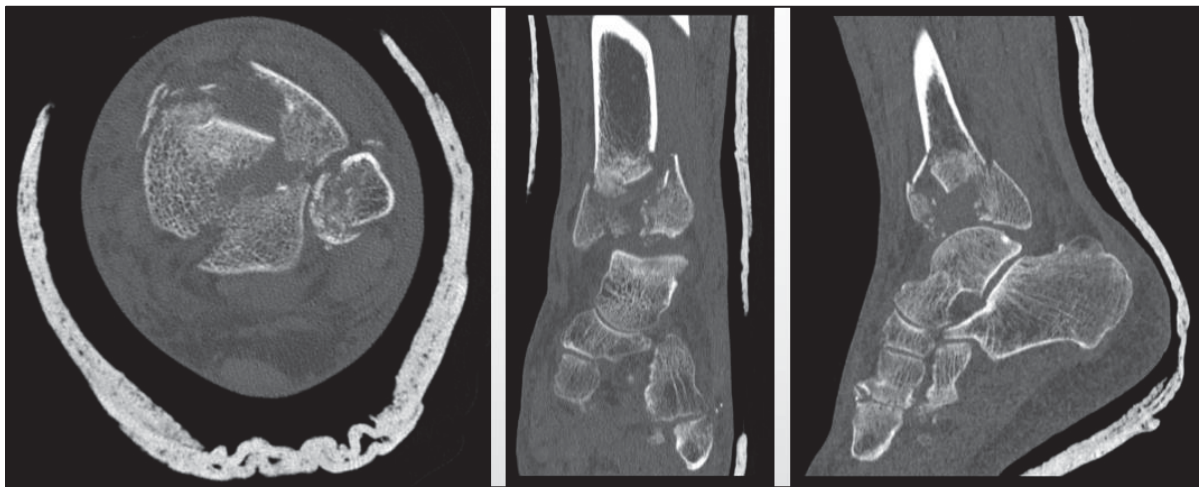


Figure 1.4 Tomodensitométrie d'une fracture du tibia distal de type 43C dans la classification de l'AO/OTA, dans les trois coupes : axiale, sagittale et coronale

1.2 Réduction des fractures

La réduction d'une fracture est une technique d'ostéosynthèse qui consiste à réparer une fracture ou une luxation afin de la restaurer dans un alignement anatomique correct. Les enjeux de la chirurgie orthopédique sont de recréer l'anatomie normale de l'os fracturé en minimisant le traumatisme sur les tissus mous et en corrigeant le déplacement des fragments (Jiménez-

Delgado et al., 2020), puis de fixer le bloc articulaire avec la diaphyse et d'éviter les complications (Joveniaux et al., 2010).

La complexité de réduction d'une fracture peut dépendre de plusieurs facteurs dont principalement la gravité du traumatisme, l'état des tissus mous et affecter la technique d'ostéosynthèse employée, la stabilité de la fixation et la rééducation (Korkmaz et al., 2013).

Le résultat optimal de la réduction d'une fracture serait la reconstruction anatomique de la surface articulaire qui permet la guérison avec les autres parties de la cheville. La restauration de la surface articulaire et l'alignement de l'extrémité de l'os vont aider à préserver la fonction de la cheville. La réduction de la fracture doit donc viser une réduction anatomique et une fixation stable de la surface articulaire (Carter et al., 2019; Korkmaz et al., 2013). Cependant, cela reste compliqué à réaliser en raison de l'absence de support osseux métaphysaire, d'une fragmentation corticale importante ou d'une fragmentation sévère de la surface articulaire (Grose et al., 2007).

Il existe plusieurs techniques d'ostéosynthèse pour réaliser une réduction de fracture, comme la réduction ouverte et la fixation interne traditionnelle ; la fixation externe avec ou sans fixation interne limitée ; l'enclouage intramédullaire ou l'ostéosynthèse par plaque mini-invasive (Grose et al., 2007; Joveniaux et al., 2010).

Le type d'ostéosynthèse est déterminé par le chirurgien en fonction du type de fracture, de la localisation des fragments et des lésions cutanées. Les techniques utilisant l'assistance d'une fixation externe sont plus protectrices des tissus mais ne permettent pas d'obtenir une restauration articulaire précise (Grose et al., 2007). L'analyse des parties fracturées est importante pour la prise de décision de la procédure chirurgicale à préconiser. Dans le cas où la fibula est touchée, la planification de l'opération doit tenir compte la perte de longueur du tibia (Rotter & Gierer, 2017). La réduction ouverte et la fixation interne (ORIF) des fractures intra-articulaires de l'extrémité distale du tibia et de la fibula restent un défi thérapeutique (Teeny & Wiss, 1993). Les Figures 1.5 et 1.6 montrent le placement des plaques et des vis par

voie antérolatérale pour maintenir la réduction de fracture du tibia distal sur un schéma et sur une radiographie.

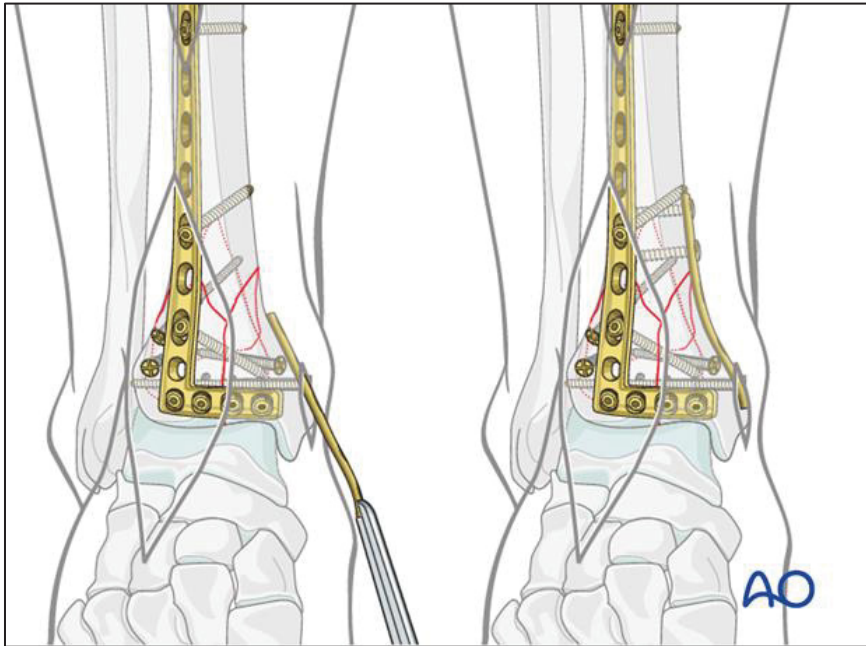


Figure 1.5 Réduction ouverte et fixation interne - Placement des différentes plaques et vis par voie antérolatérale

Tiré de ORIF - Plate and Screws through Anterolateral Approach for Complete, Multifragmentary Articular and Metaphyseal Fracture (s. d.)

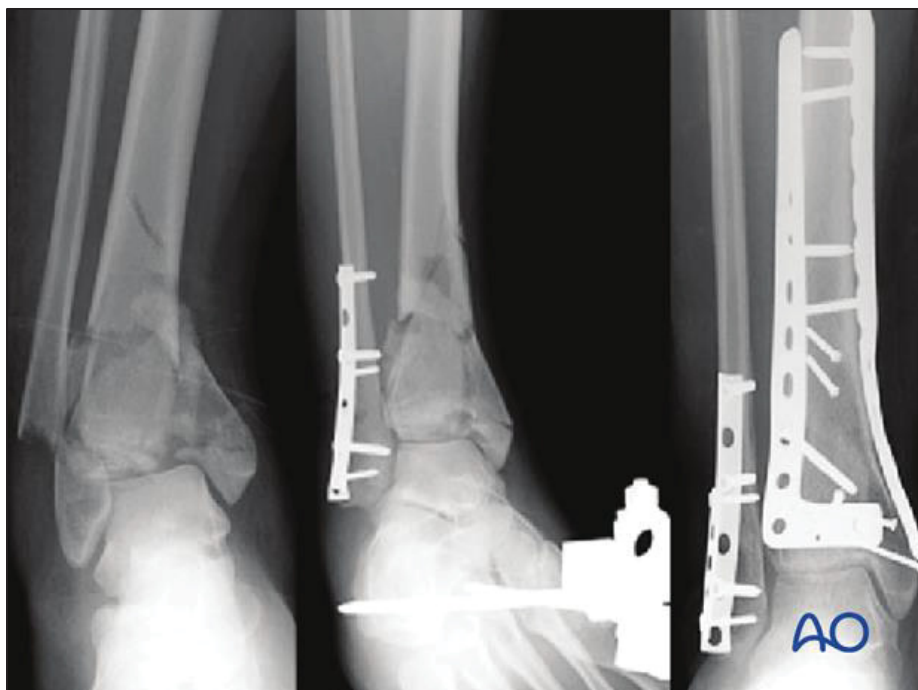


Figure 1.6 Radiographie postopératoire d'une fracture du tibia distal
Tiré de ORIF - Plate and Screws through Anterolateral Approach for Complete, Multifragmentary Articular and Metaphyseal Fracture (s. d.)

1.3 Outils de formation chirurgicale

La formation chirurgicale conventionnelle se compose d'une partie théorique et d'une partie pratique. La formation théorique est réalisée de la même manière que la planification de la chirurgie. Dans les deux cas, les objectifs sont de réduire le temps d'intervention, d'améliorer le taux de réussite et les bénéfices pour le patient après chirurgie. L'enseignement a plus spécifiquement pour objectif d'aider les résidents à comprendre la procédure pour obtenir la position et la rotation de chaque fragment osseux au sein de la fracture (Luque-Luque et al., 2021). Pendant cette procédure, il est également important de prendre en compte les lésions des tissus mous environnants pour planifier au mieux l'opération. Les lésions peuvent être plus importantes que la fracture en elle-même (Luque-Luque et al., 2021; Rotter & Gierer, 2017). Rotter & Gierer (2017) indiquent que trois paramètres sont à évaluer pour effectuer la réduction d'une fracture : la forme de la fracture, les lésions des parties molles et la procédure

d'ostéosynthèse. Les lésions des tissus mous peuvent occasionner des infections et causer des complications en raison de leur fragilité (Grose et al., 2007).

Afin d'enseigner une réduction de fracture, des images radiographiques et tomodensitométriques sont étudiées à l'aide d'une visionneuse PACS (Picture Archiving and Communication System). Une visionneuse PACS est un moyen informatisé d'acquérir, de stocker, de transmettre et d'afficher numériquement les images médicales. Son usage dans les hôpitaux permet de réduire les risques de pertes, de vols ou de classements mal effectués des images. La base de données PACS regroupe automatiquement toutes les images par ordre chronologique, avec une orientation et un étiquetage correct, afin de les récupérer à l'aide de divers critères (Strickland, 2000). La Figure 1.7 montre la coupe sagittale d'une fracture du tibia distal avec une visionneuse PACS.

L'étude des images est essentielle pour identifier la localisation et la gravité de la fragmentation articulaire (Grose et al., 2007).



Figure 1.7 Interface de la visionneuse PACS avec des images d'une fracture du tibia distal

Plus généralement, la formation chirurgicale conventionnelle consiste à acquérir des compétences en s'entraînant sur des patients en salle d'opération sous une supervision étroite (Yehyaw et al., 2013). Cependant, cette formation orthopédique dépend de l'exposition des résidents à des cas chirurgicaux. Des restrictions du temps de travail ont réduit le nombre d'heures de formation disponibles au cours de la période de formation désignée. Le manque d'uniformité de la formation des résidents reste un problème. Le coût de la formation, l'exposition inadéquate des résidents en orthopédie à l'ensemble des cas nécessaires et la nécessité d'assurer la sécurité des patients tout en maximisant l'expérience des résidents sont des facteurs à prendre en compte dans la formation des résidents. Les résidents ont un temps opératoire limité et moins d'autonomie pendant leur apprentissage. Le peu de diversité des cas que peut rencontrer un chirurgien rend la formation insuffisante (Marchand & Sciadini, 2020; Stirling et al., 2014; Vaughan et al., 2016; Yehyaw et al., 2013).

La formation chirurgicale peut aussi impliquer des spécimens de cadavres ou des animaux. Leur usage permet de bien comprendre les plans de dissection et de s'exercer à la manipulation des tissus mous. Les modèles cadavériques sont également utilisés dans les exercices standard de compétences chirurgicales en traumatologie orthopédique. Leur utilisation permet de réduire les erreurs avant une opération en situation réelle. Cependant, elle présente des inconvénients financiers et temporels. La formation médicale avec des cadavres présente également un défaut au niveau du nombre de requis pour réaliser une simulation chirurgicale (Marchand & Sciadini, 2020; Negrillo-Cárdenas et al., 2022; Stirling et al., 2014; Vaughan et al., 2016).

Il existe d'autres dispositifs pour la formation chirurgicale, comme des modèles de fractures osseuses composites, des exercices pratiques pré procéduraux ou encore une analyse des tâches cognitives. Cependant, le manque de tissus mous des modèles composites ainsi que l'absence de test des compétences motrice au niveau de l'analyse des tâches cognitives rendent ces dispositifs contraignants (Marchand & Sciadini, 2020).

La simulation chirurgicale peut aider à combler les lacunes de la formation chirurgicale standard. Son objectif est d'imiter les patients et les procédures pour que les compétences soient maîtrisées et pratiquées sur un modèle avant les soins aux patients. Les simulateurs chirurgicaux reproduisent le déroulement d'une chirurgie pour développer des compétences psychomotrices chirurgicales utilisées en salle d'opération sans compromettre la sécurité des patients (Lewis et al., 2022; Stirling et al., 2014).

La simulation chirurgicale présente plusieurs avantages. Les résidents peuvent pratiquer des procédures importantes qui sont peu fréquentes ou qui ne sont pas rencontrées dans le cadre de leur formation standard. Cela les aide au développement des compétences cognitives individuelles et collectives pour la résolution de problème, la prise de décision et le comportement en équipe (Stirling et al., 2014). Ils peuvent également répéter des procédures chirurgicales de manière efficace jusqu'à l'acquisition complète des compétences (Marchand & Sciadini, 2020).

La simulation chirurgicale est un outil qui permet aux résidents de pratiquer des compétences dans un environnement sûr et contrôlé tout en réduisant les risques pour les patients (Marchand & Sciadini, 2020; Stirling et al., 2014; Vaughan et al., 2016). Les erreurs médicales peuvent être réduites tout en améliorant l'efficacité de l'opération et des résultats pour les patients. Cela apporte une valeur ajoutée au système de soins de santé et un avantage financier. De plus, l'utilisation de simulateur par les résidents se traduit par une amélioration des compétences lors des interventions chirurgicales réelle. La simulation permet une formation plus uniforme, une expérience plus équitable pour les résidents et l'acquisition des compétences requises (Marchand & Sciadini, 2020; Vaughan et al., 2016).

Plus particulièrement, les simulateurs en réalité virtuelle permettent de reproduire des situations cliniques et favorisent la répétition de ces situations. Les résidents peuvent analyser l'anatomie initiale et comprendre les actions à effectuer pour atteindre une position osseuse anatomique correcte en répétant les mouvements requis (Negrillo-Cárdenas et al., 2022). Les résidents doivent comprendre les aspects tridimensionnels d'un modèle de fracture et corrélér

cette compréhension avec les vues tomodensitométriques bidimensionnelles pour acquérir des techniques de réduction des fractures (Yehyaw et al., 2013). La réalité virtuelle permet de mieux comprendre les structures osseuses complexes en 3D et la manipulation des instruments. La notation et l'évaluation peuvent aider à obtenir une note objective et impartiale avec possibilité de répéter la simulation. La conscience visuospatiale de l'anatomie est également développée en s'exerçant avant les procédures in vivo (Marchand & Sciadini, 2020; Vaughan et al., 2016).

Dans la section suivante, on s'intéresse plus particulièrement à l'utilisation de la réalité virtuelle pour la formation chirurgicale en orthopédie.

1.4 Usage de la réalité virtuelle dans la chirurgie orthopédique

La réalité virtuelle est un outil de plus en plus utilisé pour les formations chirurgicales. Les principaux domaines étudiés incluent la chirurgie de la fracture de la hanche, ainsi que les procédures de base en chirurgie.

L'étude de Blyth et al. (2007) a montré que le système de formation en réalité virtuelle développé fournissait un bon retour constructif sur les performances réalisées pour la fixation des fractures de la hanche. Leur méthode d'évaluation se basait sur un questionnaire élaboré par des chirurgiens orthopédiques pour l'identification des caractéristiques du simulateur. D'autres études ont été réalisées pour valider la construction d'un simulateur en réalité virtuelle de la chirurgie de fracture du tibia. En évaluant différentes métriques dont le temps total de simulation, ces études ont permis de valider le fait qu'un simulateur en réalité virtuelle peut permettre l'acquisition des aptitudes et compétences chirurgicales basiques dans un environnement contrôlé sans compromettre la sécurité du patient. Ces simulateurs peuvent également être un complément à la formation orthopédique traditionnelle et amélioreraient les compétences des novices (Akhtar et al., 2015; Sugand et al., 2015).

D'autres études ont évalué l'influence de la réalité virtuelle pour les procédures de base en chirurgie. Blumstein et al. (2020) ont montré que la formation en réalité virtuelle a permis de meilleurs résultats que la formation du guide standard pour la procédure d'enclouage intramédullaire. Dans leur étude, une comparaison est faite entre un programme en réalité virtuelle et un guide standard via une liste de contrôle de la procédure. Plusieurs critères ont été examinés dont le temps d'exécution. Lamb et al. (2023) ont repris ces travaux afin d'évaluer la réalité virtuelle en tant que modèle de formation pour la chirurgie orthopédique. Les métriques étudiées sont le temps de réalisation de la procédure, le nombre de réorientation et un questionnaire pour évaluer l'expérience des participants. Leur résultat montre une amélioration des performance et valide l'efficacité de la réalité virtuelle en tant qu'outil de formation chirurgicale.

Plus largement, des études ont évalué l'usage de la réalité virtuelle pour des procédures chirurgicales. McKinney et al. (2022) ont démontré que la réalité virtuelle permettait d'améliorer la formation des résidents sur l'exécution de la procédure chirurgicale ainsi que sur le temps de la formation. Pour leur évaluation, ils ont comparé les performances des résidents formés sur un simulateur de réalité virtuelle immersif à celles des résidents formés par une méthode traditionnelle dans une simulation « SawBones » (Pacific Research Lab, États-Unis d'Amérique) d'arthroplastie partielle du genou utilisant des implants et des plateaux chirurgicaux standardisés par l'industrie. Colcuc et al. (2024), quant à eux, suggèrent que la visualisation en réalité virtuelle offre des avantages par rapport à la méthode conventionnelle pour la planification chirurgicale des fractures complexes du plateau tibial. Leur méthode d'évaluation se base sur le temps de planification, la classification et la compréhension de la fracture ainsi qu'un questionnaire subjectif du chirurgien dans la planification préopératoire.

Au travers de toutes ces études, il apparaît que la réalité virtuelle peut servir de différentes manières pour améliorer la procédure dans la formation chirurgicale. La réalité virtuelle semble également offrir un avantage dans la visualisation par rapport à une méthode standard. Les éléments d'évaluation de ces études se basent principalement sur le temps d'exécution de la procédure mais également sur des questionnaires pour recueillir le ressenti des participants.

Toutefois, il n'existe pas d'étude sur la formation en réalité virtuelle pour la réduction spécifique des fractures du tibia distal.

1.5 Protocole « thinking-aloud »

Afin de mieux comprendre comment est effectuée la formation théorique de réduction des fractures du tibia distal, un protocole de réflexion à haute voix a été employée dans ce projet. Ce protocole a permis de mieux appréhender le processus de formation. Le protocole de réflexion à haute voix est une méthode qui demande aux sujets de parler à haute voix pendant qu'ils résolvent un problème ou exécutent une tâche. Cette méthode est axée sur la verbalisation libre et spontanée. La parole permet de capturer les pensées de l'utilisateur telles qu'elles apparaissent à ce moment précis. Les utilisateurs sont encouragés à exprimer à voix haute ce qu'ils pensent (De Morais et al., 2017; Jaspers et al., 2004; Solomon, 1995). La structuration des informations recueillis est ensuite traitée pendant l'analyse du protocole.

Cette méthode a des applications dans la recherche éducative sur les processus cognitifs et l'acquisition de connaissances dans le contexte de la construction de système informatiques basés sur la connaissance (Jaspers et al., 2004).

Le protocole de réflexion à haute voix permet alors de créer des modèles de processus cognitifs pour développer une solution au problème posé initialement (Solomon, 1995).

1.6 Questionnaires d'utilisabilité standard

Le « System Usability Scale » mesure le score d'utilisabilité. Le questionnaire est composé de 10 questions avec un score de 1 à 5 sur l'échelle de Likert. Les questions doivent être posé dans l'ordre établie de manière standard pour éviter les biais. Pour cette étude, les réponses à donner étaient sur une échelle de 1 à 10 pour plus de précision. Les réponses ont été rapporté à 5 pour calculer le score d'utilisabilité. Le calcul de ce score est divisé en plusieurs étapes. Il faut soustraire 1 au score des questions impaires (1, 3, 5, 7 et 9). Il faut soustraire le score des questions paires (2, 4, 6, 8 et 10) à 5. Chaque nouveau score est additionné pour obtenir un

nombre entre 0 et 40. A ce nouveau résultat, une multiplication par 2,5 permet d'obtenir le score final d'utilisabilité.

Un score au-dessus de 80 signifie que l'utilisabilité de l'outil étudié est très bien construite. Entre 70 et 80, l'interface d'utilisation est assez bonne pour être utilisée, mais peut être améliorée. En dessous de 70, l'interface est à revoir. (Brooke, 1996)

L'indice de charge de travail de la NASA, « NASA-TLX » aide à mesure la charge de travail sous 6 aspects : exigences mentales, physiques et temporelle, frustration, effort et performance. Ces aspects cherchent à représenter l'expérience subjective de la charge de travail, celle-ci désignant le coût humain lié à l'accomplissement des tâches dans une mission (Hart & Field, s. d.). Pour cette étude, les réponses à donner ont également été sur une échelle de 1 à 10. Afin de calculer l'indice de charge de travail, une version modifiée de l'indice a été utilisé : le RTLX (Raw Task Load Index). Le RTLX est une version simplifiée du TLX, qui mesure la charge de travail de manière très détaillée. Le RTLX calcule la somme des résultats obtenus. Un score élevé indique une charge de travail plus importante (Byers et al., 1989; Orn, 2023).

CHAPITRE 2

PROBLÉMATIQUE, OBJECTIFS ET HYPOTHÈSES

La formation des résidents est composée d'une partie théorique et d'une partie pratique. La théorie est étudiée sur des tomodensitométries de patients à l'aide d'outil conventionnel comme une visionneuse PACS et la pratique consiste à réaliser la chirurgie sous la supervision étroite d'un chirurgien expérimenté. Au niveau théorique, l'enseignement se découpe en deux parties : la compréhension de la fracture et la manière dont la fracture va être opérée. La partie pratique donne l'occasion aux résidents de réaliser la stratégie opératoire choisie pour les différents patients étudiés sous la supervision étroite d'un chirurgien expert. L'étude réalisée se concentre sur la partie théorique de la formation pour assimiler la fracture et comment pourrait être réalisé la chirurgie.

Afin d'améliorer l'enseignement donné aux résidents, des outils de simulation chirurgicales ont été développés pour permettre aux utilisateurs de pratiquer des procédures dans un environnement sûr et contrôlé en réduisant le risque pour les patients. Ces outils de formation existent principalement pour des chirurgies d'arthroplasties mais il n'existe à ce jour pas d'outil pour acquérir les compétences en réduction de fractures du tibia distal.

L'objectif principal de ce projet est d'étudier la valeur ajoutée de la visualisation en réalité virtuelle des fractures du tibia distal par rapport aux images tomodensitométriques examinées sur un système PACS.

Cet objectif est réalisé par le développement d'un outil de visualisation en réalité virtuelle pour la chirurgie de réduction des fractures du tibia distal. Cet outil permet aux utilisateurs de visualiser la structure osseuse du tibia.

L'outil développé est ensuite évalué à l'aide d'un protocole de réflexion à haute voix ainsi que d'une analyse vidéo.

Une première hypothèse est que cette simulation rendra l'explication plus visuelle et permettra une interaction plus simple que la méthode conventionnelle.

Une deuxième hypothèse est que le temps d'utilisation de l'outil en réalité virtuelle ne sera pas supérieur à celui de la méthode conventionnelle, ce qui suggérerait que la réalité virtuelle n'introduit pas de contrainte supplémentaire en termes de durée d'utilisation.

CHAPITRE 3

MÉTHODOLOGIE

3.1 Introduction à la méthodologie

Une observation des images tomodensitométriques fournies par un chirurgien orthopédiste spécialisé en traumatologie a permis de comprendre la forme des fractures complexes du tibia distal. Ensuite, un outil en réalité virtuelle a été réalisé pour visualisation ces fractures. Par la suite, une étude usager a été réalisée avec l'aide d'un chirurgien dans le but de comparer la méthode conventionnelle de formation avec l'outil de formation développé en réalité virtuelle.

3.2 Développement de l'outil en réalité virtuelle

Pour permettre à des utilisateurs de réaliser des simulations chirurgicales, un outil de formation en réalité virtuelle pour la chirurgie de réduction de fractures du tibia distal a été développé. Afin de développer cet outil, une approbation éthique du *Biomedical Research Ethics Board* de l'Université de Manitoba et une évaluation éthique par le Comité Éthique de la recherche de l'ÉTS ont été reçues pour l'utilisation de données d'imagerie médicale dans le cadre de ce développement.

3.2.1 Jeux de données

Pour le développement de cet outil, six patients ont accepté de donner accès à leur images radiographiques et tomodensitométriques anonymes. Les images des patients traités au Health Sciences Center de Winnipeg pour des fractures du tibia distales de type AO 43B et 43C ont été examinées rétrospectivement. Tous les patients ayant bénéficié d'une tomodensitométrie clinique pouvaient être inclus dans l'étude. Chaque patient a été identifié par un identifiant unique.

Les données DICOM anonymisées sont des images tomodensitométriques ayant une résolution variant entre 0,3 mm et 0,6 mm et une épaisseur de coupe de 0,62 mm. La taille de ces images est de 512 x 512 pixels et elles couvrent la partie supérieure de la diaphyse du tibia jusqu'au pied.

3.2.2 Modèles tridimensionnels des fractures du tibia distal

Afin de créer des modèles tridimensionnels des fractures du tibia distal, les données tomodensitométriques anonymes ont été importées dans le logiciel 3D Slicer (version 5.6.1). L'objectif de création de ces modèles tridimensionnels était de permettre à l'utilisateur de déplacer et de repositionner les fragments osseux obtenus pour réduire la fracture.

3D Slicer est un logiciel à code ouvert qui permet la visualisation et l'analyse d'images médicales ainsi que la navigation chirurgicale dans une interface utilisateur graphique. Cette plateforme peut être utilisée dans diverses applications de recherche clinique et préclinique en imagerie médicale. 3D Slicer possède plusieurs modules de base comme des outils de segmentation, de rendu volumétrique ou encore de manipulation de transformations spatiales (Fedorov et al., 2012).

Plus précisément, 3D Slicer possède un module général pour réaliser une segmentation en imagerie médicale. Cela permet d'extraire une ou plusieurs régions de l'image médicale pour former la zone d'intérêt. Un seuillage a d'abord été appliqué sur les images pour se concentrer sur la structure osseuse du tibia. La partie spongieuse de l'os du tibia n'a pas été représentée dans la zone d'intérêt, seule la partie corticale a été gardée, principalement au niveau de l'articulation. De plus, bien que la fibula puisse être également fracturée et peut avoir de l'importance quant au diagnostic d'une réduction de fracture, seul le tibia fracturé visible sur les images médicales a été reproduit. Les tissus mous n'ont pas été modélisés en trois dimensions pour se concentrer sur la structure osseuse du tibia.

Ensuite, à l'aide d'outils semi-automatiques, une segmentation manuelle a été appliquée au seuillage effectué (Voir Figure 3.1). Cette segmentation a permis de modéliser les différents fragments osseux en plusieurs modèles tridimensionnels dissociés pour pouvoir les manipuler séparément. La visualisation de ces modèles tridimensionnels a été faite avec l'usage d'un casque de réalité virtuelle.

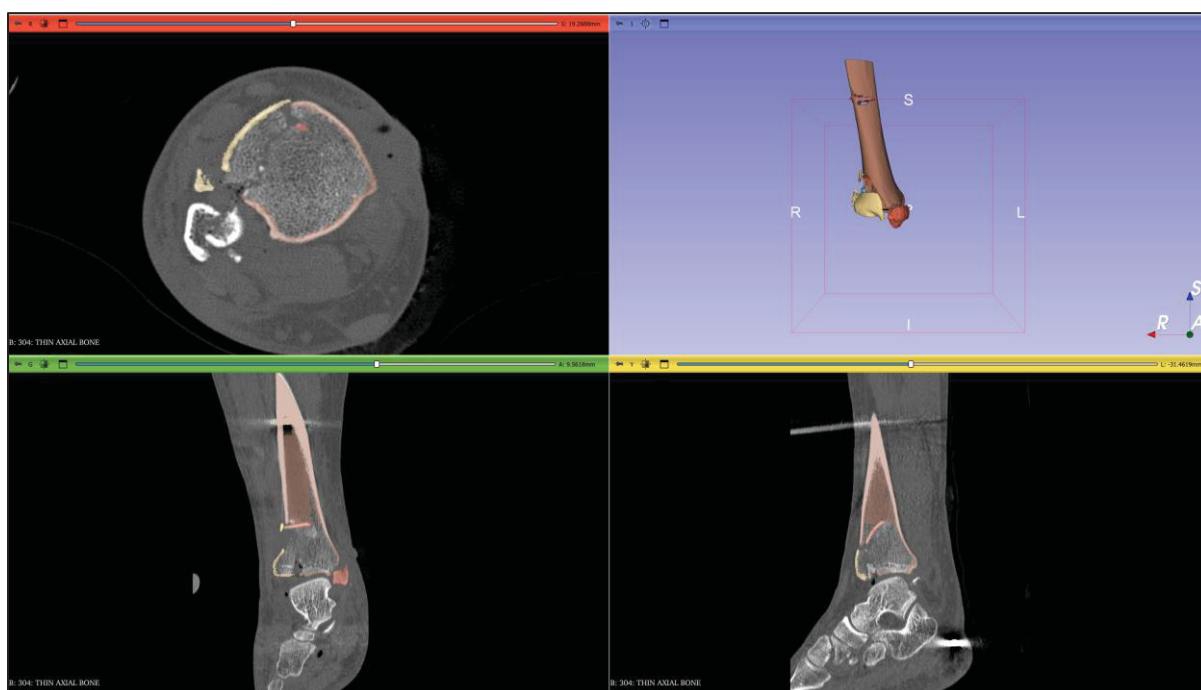


Figure 3.1 Tomodensitométrie d'une fracture du tibia distal avec la segmentation de l'os cortical, représentation en trois dimensions de la segmentation réalisée en haut à droite

3.2.3 Outil de visualisation en réalité virtuelle

L'outil de visualisation en réalité virtuelle a été développé dans Unity (version 2022.3.23f1). Les modèles tridimensionnels réalisés dans 3D Slicer ont été importés dans Unity pour continuer le développement de l'outil en réalité virtuelle.

3.2.3.1 Interface et environnement virtuel

L'environnement virtuel est composé d'une salle vide. L'objectif de cette salle était de laisser au participant un repère dans l'espace. L'environnement virtuel est construit pour être minimaliste, afin que l'utilisateur se concentre sur la visualisation de la fracture. La Figure 3.2 illustre l'affichage du modèle osseux tridimensionnel dans l'environnement virtuel.

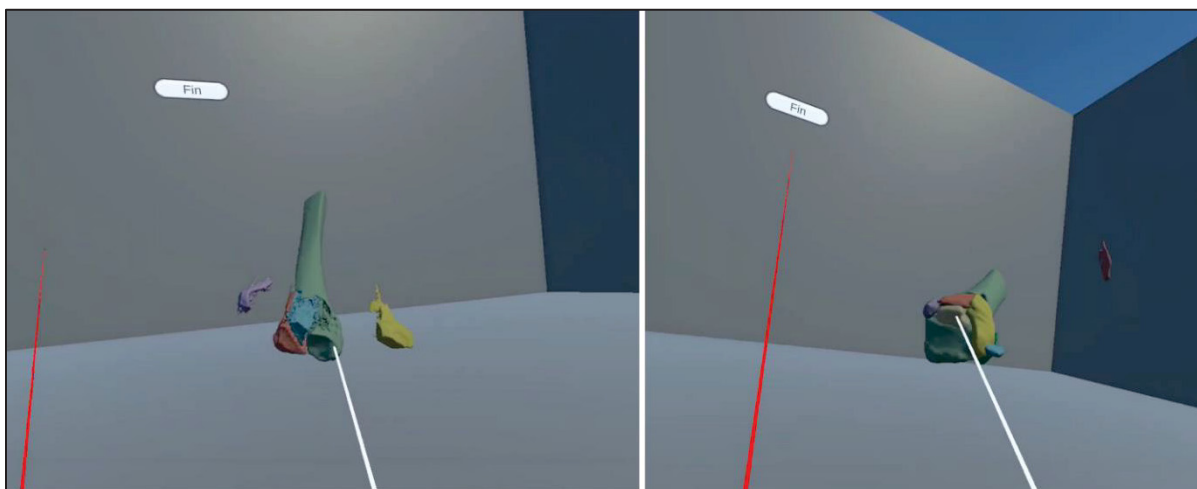


Figure 3.2 Environnement virtuel et visualisation des fractures du tibia distal en réalité virtuelle

3.2.3.2 Modes d'interaction

Afin de comprendre la structure anatomique du tibia et de repositionner correctement les fragments osseux, le chirurgien va avoir plusieurs modes d'interaction possible. Les fractures sont manipulables de différentes manières. Chaque fragment osseux représente un modèle 3D unique (Voir Figure 3.3).

Le participant a la possibilité de déplacer la totalité des fragments osseux, afin qu'il puisse réaliser des rotations de l'os fracturé entier. Cela permet au participant de voir sous différents angles la fracture. Pour réaliser cette interaction, le participant appuie simultanément sur le bouton grip des deux manettes afin d'attraper tous les modèles osseux. Il maintient ensuite les boutons pour réaliser la translation et la rotation des objets 3D. Le mouvement des manettes

va permettre de déplacer et d'effectuer des rotations sur l'entièreté des modèles. Une fois que le participant est satisfait de l'orientation de l'os fracturé, il peut relâcher les deux boutons afin d'arrêter cette interaction.

Un autre mode d'interaction pour le participant est de déplacer individuellement les fragments osseux à l'aide des manettes du casque de réalité virtuelle. Chaque manette lance un rayon qui permet au participant de savoir quel fragment osseux va être sélectionné. Le participant doit pointer le rayon vers un fragment et maintenir appuyer le bouton grip de la manette pour pouvoir sélectionner le fragment. Ce rayon permet d'être précis dans la sélection du fragment. En déplaçant la manette, le participant peut déplacer en même temps le fragment osseux sélectionné. Le participant peut donc positionner le fragment à la position qu'il veut. Cette interaction s'arrête lorsque le participant relâche le bouton grip (Voir Figure 3.3).

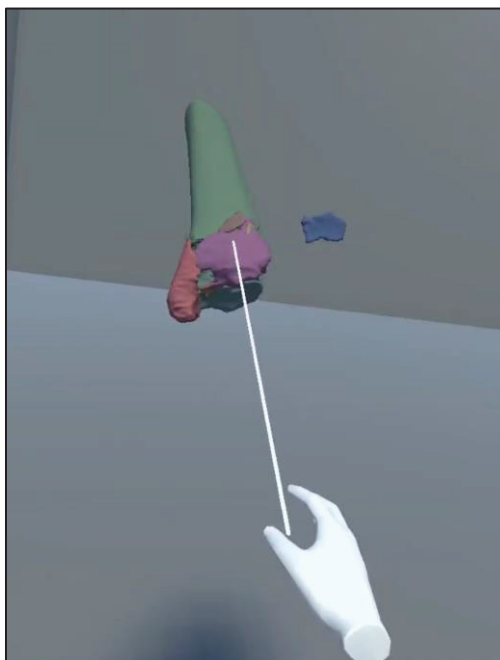


Figure 3.3 Représentation de plusieurs fragments osseux d'un cas étudié, manipulation d'un fragment osseux en réalité virtuelle

3.3 Étude usager

Afin de valider les hypothèses émises, une étude usager est mise en place pour tester et comparer l'utilisation d'un outil de réalité virtuelle avec celle de la visionneuse PACS standard. Pour chaque outil, une explication de la formation de réduction de fracture est réalisée en décrivant toutes les étapes à haute voix. Le déroulement de l'étude est détaillé dans les sections suivantes.

3.3.1 Participant

Le participant à cette étude est notre chirurgien orthopédiste qui va prendre part à cette étude en tant qu'expert clinique. Le protocole de l'étude usager a fait l'objet d'une évaluation éthique par le Comité Éthique de la recherche de l'ÉTS et du Comité Éthique de la recherche du Centre de Recherche du Centre Hospitalier de l'Université de Montréal (CRCHUM). Néanmoins, notre partenaire clinique ne répond pas à la définition de participants selon l'Article 2.1 de l'Énoncé de politique des trois Conseils – Éthique de la recherche avec des êtres humains (EPTC2). De ce fait, une exemption d'un certificat d'éthique a été obtenue de la part du CER de l'ÉTS et du CER du CRCHUM pour la participation de notre partenaire clinique.

3.3.2 Déroulement de l'étude usager

Pour le déroulement de l'étude usager, une courte présentation est faite au chirurgien afin de lui expliquer le déroulement de l'étude. Cette étude se découpe en deux parties.

À partir des tomodensitométries ou des modèles tridimensionnels, le participant doit expliquer à haute voix toutes les étapes à réaliser pour effectuer une réduction de fracture et quels sont les éléments ou informations à prendre en compte dans chaque cas présenté.

Pour la première partie de l'étude, il est demandé à l'expert de planifier et d'enseigner une réduction de fracture de six cas cliniques à partir de tomodensitométries visualisées sur le système PACS standard. Ensuite, la seconde partie de l'étude consiste à réaliser les mêmes

opérations à l'aide du système de visualisation en réalité virtuelle développé dans la section précédente de ce mémoire. Cette seconde partie a lieu deux jours après la première partie de l'étude. L'ordre des cas a été randomisé pour les deux parties de l'étude pour éviter d'avoir des biais de mémorisation. Après le déroulement de la première partie, le clinicien a eu un temps de pratique pour prendre en main l'outil de visualisation en réalité virtuelle.

Dans les deux parties de l'étude, le participant sera encouragé à constamment parler comme s'il était seul dans la pièce. Les interruptions vont être limitées au minimum. La seule expression utilisée sera « Continuez à parler » pour rompre les silences de plus de 15 secondes pour l'inciter à exprimer à haute voix tout le processus. Il est demandé au participant de dire à voix haute lorsqu'il estime avoir fini son explication et qu'elle n'apportera pas d'information supplémentaires.

Pour finaliser les deux parties de l'étude, le participant a répondu à deux questionnaires d'utilisabilité standard, le « System Usability Scale » et le questionnaire sur la charge cognitive « NASA-TLX ».

3.3.2.1 Première partie : Réduction de fracture avec un système PACS standard

Chaque réduction de fracture décrite par l'expert avec la visionneuse PACS standard est enregistrée. À l'aide d'un logiciel de visioconférence, un enregistrement audio et vidéo de l'outil de visualisation conventionnelle est réalisé. L'enregistrement a débuté au moment où le participant a commencé son explication et s'est terminé lorsque l'explication est finie. Ces enregistrements sont vérifiés pour être sûr qu'ils ont fonctionné.

3.3.2.2 Deuxième partie : Réduction de fracture avec une visualisation en réalité virtuelle

Lorsque le chirurgien met le casque de réalité virtuelle, des instructions sont affichés à l'écran (Voir Figure 3.4). Après les avoir lues, l'expert appuie sur le bouton « Start ». Ce bouton fait

apparaître dans une fenêtre contextuelle la liste de tous les cas d'étude ainsi qu'un exercice d'entraînement (Voir Figure 3.5).

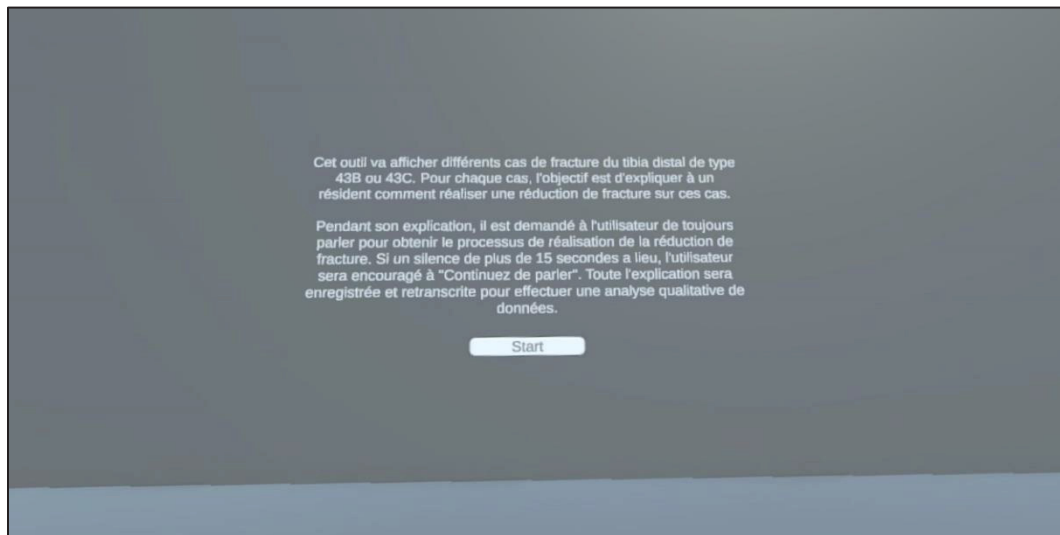


Figure 3.4 Instructions affichées dans le casque de réalité virtuelle avant d'utiliser l'outil

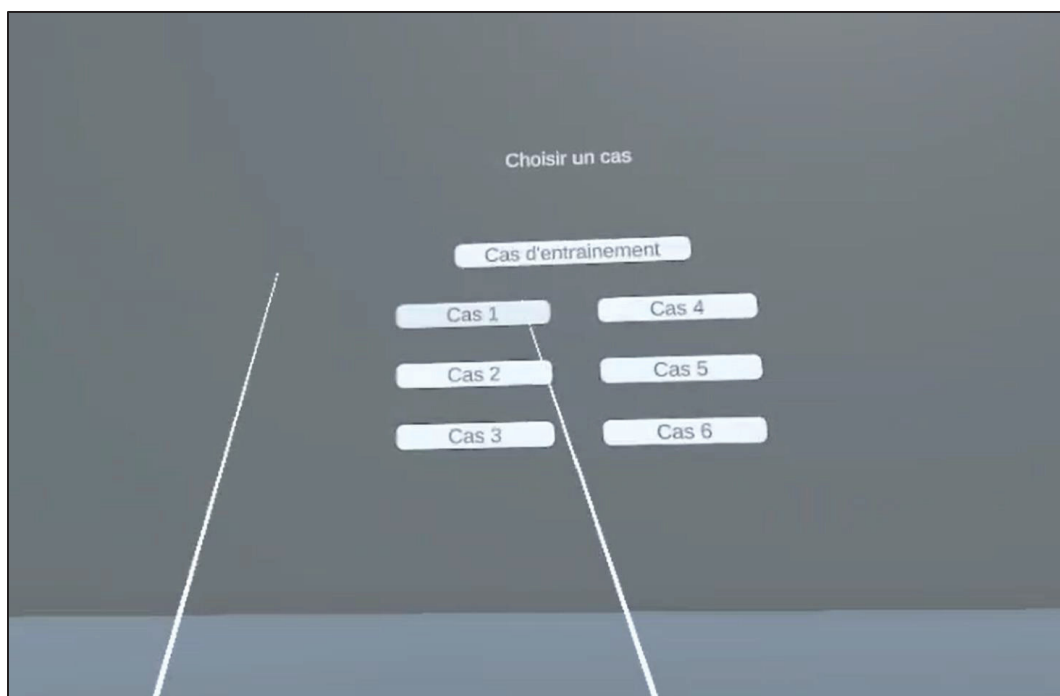


Figure 3.5 Fenêtre contextuelle contenant la liste de tous les cas d'étude ainsi que d'un exercice d'entraînement

Afin de se concentrer sur la réalisation de la procédure et non sur la prise en main de l'outil, l'expert s'entraîne à utiliser l'outil de réalité virtuelle avant de réaliser ses explications sur les cas de fracture. Un protocole d'exercice est suivi par le chirurgien afin d'effectuer avec aisance les différentes interactions présentées. Dans cet exercice d'entraînement, des objets de différentes couleurs et de différentes formes sont affichés (Voir Figure 3.6). En utilisant les manettes, le chirurgien exécute différentes actions énoncées. Cet exercice se termine lorsque les interactions deviennent intuitives au chirurgien. Pour terminer cet exercice, le chirurgien appuie sur le bouton « Finish » qui le fait revenir à la fenêtre contextuelle. Il peut ainsi étudier tous les cas présentés.

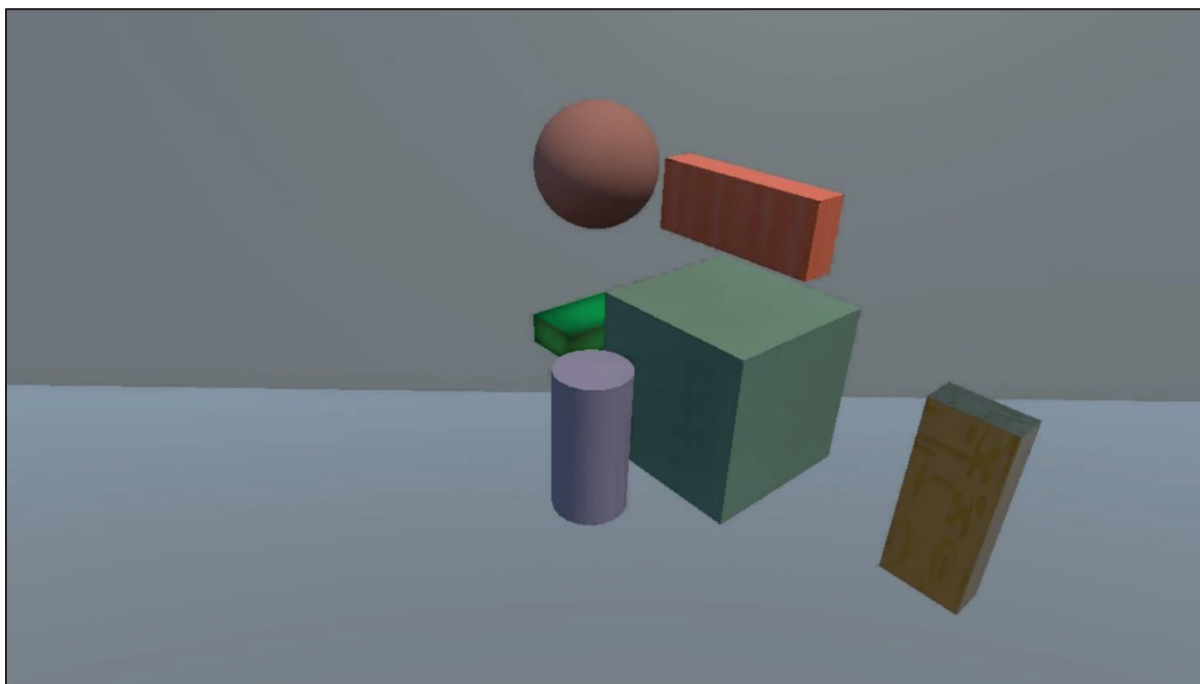


Figure 3.6 Exercice d'entraînement pour comprendre les interactions à réaliser

Chaque cas de fracture est composé de différents patients avec une fracture complexe du tibia distal. Un modèle 3D de la fracture a été réalisé dans 3D Slicer, comme décrit dans la section précédente.

Pour chaque cas étudié, le chirurgien appuie sur « Finish » lorsque l'explication est terminée ce qui fait apparaître une fenêtre contextuelle. Le chirurgien peut reprendre le cas en cours s'il appuie sur le bouton « Finish » avant d'avoir réellement fini. Il peut sinon terminer complètement le cas. Pour lancer un nouveau cas de fracture, le chirurgien appuie sur le bouton « Return » qui revient à la fenêtre contextuelle de choix de fracture pour en sélectionner une nouvelle.

Chaque réduction de fracture est également enregistrée. L'enregistrement audio et vidéo est réalisé directement dans le casque de réalité virtuelle en enregistrant un seul œil. L'enregistrement est lancé avant le début de chaque cas étudié. Il était possible de visualiser les réductions de fracture avec les explications. L'enregistrement a débuté au moment où le participant a commencé son explication et s'est terminé lorsque l'explication est finie. Avant de démarrer un nouveau cas, les enregistrements sont vérifiés pour être sûr qu'ils ont bien fonctionné. Les enregistrements ont aussi été analysés pour en tirer un processus de réduction.

3.4 Pré-traitement des données

L'analyse des données collectées s'appuie sur les méthodes utilisées par (Jaspers et al., 2004) et (De Morais et al., 2017) dans leur étude. Ils utilisent un protocole de réflexion à haute voix pour retranscrire les enregistrements verbaux qu'ils ont recueillis. Leur objectif est de découper les différentes phrases en étape pour obtenir un schéma du processus utilisé par les participants de l'étude. Le processus qu'ils ont recueilli est transposé sur un nouvel outil en gardant les principales tâches à réaliser. Cela permet généralement aux utilisateurs de faire une transition d'une version papier à une version informatisée.

Afin d'analyser les données récoltées dans le cadre de notre étude, les enregistrements verbaux sont transcrits et divisés en segments. Chaque segment représente une portion de phrase ou un seul élément d'information du cas étudié. Ces étapes permettent d'obtenir l'ordre des actions réalisées. À la suite, chaque étape se voit attribuer un label afin de classer les différentes informations. Les codes sont découpés dans les catégories suivantes : information sur la

fracture (type de fracture, articulation fracturée ou non), stratégie de reconstruction et application de la stratégie. Ces catégories ont été obtenus en synthétisant toutes les actions réalisées et les regrouper dans des catégories plus globales.

En complément des transcriptions, les vidéos enregistrées ont également été analysé. Des codes ont été défini pour représenter chaque action faite avec l’outil de réalité virtuelle ou avec la méthode conventionnelle. Ces actions ont été déterminées à l’aide des transcriptions, les actions étant pour la plupart réalisé en même temps que l’explication. Pour les moments où il n’y avait pas de parole, l’action était explicite pour la comprendre. Plusieurs actions sont regroupées sous le même code, elles représentent le même type d’action. Les actions comme « Montrer l’ensemble du tibia » ou « Montrer une partie du tibia » sont codées plus largement avec le label « Montrer le tibia ». Des codes plus distincts sont donnés en fonction de l’outil utilisé. Avec la méthode conventionnelle, l’action principale est le déroulé à travers les coupes de tomodensitométrie. D’une autre façon, l’action principale en réalité virtuelle est la rotation de la fracture entière.

Il est également possible de prendre en compte les pointages réalisés à l’aide la manette, qui sert à montrer un fragment, une approche ou le positionnement de plaque.

3.5 Tests statistiques

Afin d’évaluer les résultats obtenus, des test T de Student appariés ont été effectué pour les différentes comparaisons effectuée. Tout d’abord, un test T de Student a été réalisé afin de déterminer si la durée des explications avec la méthode conventionnelle était significativement inférieure par rapport à la réalité virtuelle. Le même test a été réalisé avec les données réajustées, les détails sont présentés dans la section suivante.

Suite au pré-traitement de données, une comparaison a été faite pour chaque catégorie, à savoir « Déterminer le type de fracture », « Stratégie de reconstruction » et « Application de la stratégie choisie ». Des tests T de Student ont été utilisés dans un premier temps pour comparer

le nombre de mots employés dans ces catégories, afin de déterminer s'il y a une différence constatée dans les deux méthodes étudiées. Dans un deuxième temps, la durée de ces catégories a été étudiée pour déterminer s'il y avait une différence significative entre les deux outils.

Enfin, avec le découpage des actions réalisées dans les vidéos, ces actions ont été étudiées au niveau de leur nombre et de leur durée. Un test T de Student a également été utilisé pour déterminer s'il y a une différence significative entre les deux méthodes étudiées.

CHAPITRE 4

RÉSULTATS

4.1 Analyses de la durée des explications

4.1.1 Durée des enregistrements

Dans un premier temps, la durée des enregistrements a été étudiée pour les enseignements effectués avec la méthode conventionnelle et en réalité virtuelle. Le Tableau 4.1 montre la durée des explications pour chaque cas, exprimée en secondes. Le temps moyen pour la réalisation des explications pour l'enseignement de la chirurgie de réduction de fracture du tibia distal est plus court sur la visionneuse PACS qui est l'outil que le chirurgien utilise habituellement pour ces enseignements par rapport à la réalité virtuelle. Il n'y a pas de différence significative entre les durées d'explication entre la méthode conventionnelle et la réalité virtuelle (p-value > 0.05).

Tableau 4.1 Durée des explications pour chaque cas exprimé en secondes

Outil	Cas 1	Cas 2	Cas 3	Cas 4	Cas 5	Cas 6	Moyenne (+/-)	P-value
PACS	286	222	249	217	269	278	253 (+/- 29)	0,11
RV	256	281	460	402	303	227	321 (+/- 90)	

4.1.2 Durée des enregistrements sans mouvement

Afin d'avoir une comparaison plus précise entre les deux outils évalués, les mouvements réalisés sans qu'aucune explication n'ait été donnée ont été enlevés des durées étudiées (Voir Tableau 4.2). Plus précisément, en réalité virtuelle, le participant réalise des mouvements, comme déplacer, repositionner des fragments ou changer le point de vue de la scène immersive, sans donner d'explication orale. En considérant uniquement le temps d'explication à l'oral en réalité virtuelle sans les mouvements du participant, le temps moyen des explications s'en

retrouve raccourci. Cependant, il n'y a aucune différence significative sur la durée d'explication en réalité virtuelle avec uniquement les explications à l'oral.

Tableau 4.2 Durée des explications pour chaque cas avec les données en réalité virtuelle réajustées, exprimée en secondes

Outil	Cas 1	Cas 2	Cas 3	Cas 4	Cas 5	Cas 6	Moyenne (+/-)	P-value
PACS	286	222	249	217	269	278	253 (+/- 29)	0,78
RV	245	222	347	225	215	227	246 (+/- 50)	

4.2 Analyse des transcriptions

Les transcriptions de la méthode conventionnelle ont été comparées à celles en réalité virtuelle. Avant d'enregistrer les enseignements, il a été rappelé au participant de donner ces explications de la même manière qu'il enseigne à ces résidents sans autre instruction.

4.2.1 Comparaisons des transcriptions

Afin de comparer les transcriptions entre les deux outils, le pré-traitement des données a permis d'obtenir des segments d'informations uniques labellisés. Chaque étape labellisée a été comparée pour déterminer si les étapes concordaient entre elles. Il apparaît que la réalisation de l'enseignement s'est déroulée de la même manière pour la méthode conventionnelle et la réalité virtuelle. Le clinicien a d'abord constaté qu'il s'agissait d'une fracture du tibia distal. Il a ensuite cherché à évaluer la fracture et savoir s'il y a une fracture au niveau de la surface articulaire du tibia. Cette évaluation a permis d'identifier le type de la fracture. Par la suite, il définit les différentes stratégies de reconstruction qu'il peut mettre en œuvre. Une fois présentées, il détaille la stratégie de reconstruction qu'il planifie avec les approches qui lui semble adéquates. Pour les 6 cas étudiés, la stratégie de reconstruction de la fracture du tibia distal était identique entre les deux outils. Il y a cependant une nuance pour un cas en réalité virtuelle où le clinicien a réalisé une première approche avant de changer car elle ne permettait pas de réaliser une bonne réduction. Il a réalisé une seconde approche qui correspond à celle explicitée avec la méthode conventionnelle.

4.2.2 Différences constatées entre méthode conventionnelle et réalité virtuelle

Une comparaison de chaque cas entre la méthode conventionnelle et la réalité virtuelle a été faite.

Pour chaque cas avec la méthode conventionnelle, le participant parcourt à plusieurs reprises les différentes coupes des tomodensitométries pour être sûr des observations qu'il a réalisées. Il commence par regarder la coupe axiale du haut du tibia vers le bas de l'articulation. Il passe ensuite à travers les différentes coupes sagittales puis coronales pour valider la stratégie. Pour confirmer ces observations, il regarde la reconstruction tridimensionnelle. A la suite, il parcourt de nouveau les différentes coupes pour expliquer sa stratégie de reconstruction et la manière dont il appliquerait la stratégie retenue.

En réalité virtuelle, le participant fait pivoter l'os fracturé entier pour avoir une vision globale de la fracture. Cela lui permet de comprendre assez rapidement quel est le type de fracture. A la suite, il explique les différentes stratégies possibles pour réaliser la réduction de fracture. Une fois la stratégie choisie, le participant commence à exposer sa stratégie de reconstruction tout en pivotant la fracture et déplaçant les fragments osseux afin de les repositionner dans la position qui semble être le plus anatomique possible, c'est-à-dire reproduire le plus possible la forme de la surface articulaire du tibia.

4.2.3 Nombre de mots

Le nombre de mots a été compté pour chaque cas d'explication. Globalement, les explications en réalité virtuelle ont demandé moins de mots que celles avec la visionneuse PACS. Cependant, il n'y a pas de différence significative pour le nombre de mots employés dans les deux méthodes étudiées ($p\text{-value} > 0.05$).

Dans le détail, les différentes étapes d'explication qui sont ressorties de la comparaison des transcriptions ont permis d'obtenir différentes phases d'explication. Le Tableau 4.3 détaille les

résultats obtenus pour le nombre de mots comptabilisés pour chaque phase identifiée à la section précédente.

Tableau 4.3 Nombre de mots employés à chaque phase d'explication pour chaque outil

Nombre de mots	Moyenne (+/-)	P-value
Type de fracture PACS	180 (+/- 42)	0,0003
Type de fracture VR	74 (+/- 24)	
Stratégies PACS	86 (+/- 43)	0,20
Stratégies VR	57 (+/- 28)	
Application stratégie PACS	372 (+/- 96)	0,16
Application stratégie VR	465 (+/- 119)	
Total PACS	637 (+/- 93)	0,54
Total VR	595 (+/- 134)	

Lors de la première phase d'explication, la méthode conventionnelle nécessitait davantage de mots pour déterminer le type de fracture. Les explications avec la méthode conventionnelle sont en moyenne de 180 (+/- 42) mots tandis que les explications en réalité virtuelle sont en moyenne de 74 (+/- 24) mots. Il y a une différence significative sur le nombre de mots employés en réalité virtuelle par rapport à la méthode conventionnelle (p-value < 0.05).

La définition des différentes stratégies de reconstruction a également demandé moins de mots en réalité virtuelle qu'avec la méthode conventionnelle, en moyenne 86 mots pour la méthode conventionnelle et 57 mots en réalité virtuelle. Il n'y a cependant pas de différence significative entre le nombre de mots employés dans cette phase (p-value = 0,20).

Enfin, il y a une tendance inverse pour l'application de la stratégie planifiée. En effet, la moitié des explications en réalité virtuelle présentaient un nombre plus important de mots que la méthode conventionnelle. En moyenne, les explications en réalité virtuelle ont pris 465 mots contre 372 mots pour les explications avec la visionneuse PACS. Il n'y a pas de différence significative entre le nombre de mots pour les deux outils dans cette phase (p-value = 0,16).

4.3 Analyse visuelle des enregistrements vidéo

En complément de l'analyse des transcriptions audio des explications, une analyse visuelle des enregistrements vidéo a été réalisée. Chaque action réalisée sur la vidéo a été mise en relation avec l'audio pour comprendre les différentes actions effectuées. À chaque changement d'image, l'enregistrement audio a permis de comprendre quelle action a été réalisée et ainsi attribué un label par action. De la même manière, les vidéos des explications faites avec la méthode conventionnelle ont été comparées à celle faites en réalité virtuelle.

4.3.1 Durée des catégories

Dans un premier temps, en utilisant la concordance entre les transcriptions et les enregistrements, les vidéos ont été découpées dans les différentes catégories suivantes :

- « Déterminer le type de fracture »
- « Expliquer les stratégies de reconstruction »
- « Appliquer la stratégie choisie »

Le Tableau 4.4 présente les résultats obtenus pour chaque catégorie.

La moyenne a été calculée pour la catégorie « Déterminer le type de fracture ». Avec la méthode conventionnelle, la moyenne est de 73 secondes contrairement à la réalité virtuelle dont la moyenne est de 35 secondes. Il y a une différence significative sur la durée des explications pour déterminer le type de fracture ($p < 0,05$).

Pour la catégorie « Expliquer les stratégies », la moyenne de durée est de 30 secondes avec la méthode conventionnelle. En réalité virtuelle, la moyenne est de 20 secondes. Après calcul de la p-value, il n'y a pas de différence significative pour la durée de cette catégorie ($p\text{-value} = 0,17$).

Enfin, la dernière catégorie « Appliquer la stratégie » a une moyenne de 150 secondes avec la méthode conventionnelle par rapport à la réalité virtuelle dont la moyenne est de 263 secondes. Il y a une différence significative sur la durée des explications dans cette catégorie ($p < 0,05$).

Tableau 4.4 Durée des explications dans chaque phase pour les deux outils

Durée des phases (en secondes)	Moyenne (+/-)	P-value
Type de fracture PACS	73 (+/- 21)	0,005
Type de fracture VR	35 (+/- 15)	
Stratégies PACS	30 (+/- 13)	0,173
Stratégies VR	20 (+/- 6)	
Application stratégie PACS	150 (+/- 30)	0,02
Application stratégie VR	263 (+/- 96)	
Total PACS	253 (+/- 29)	0,11
Total VR	321 (+/- 90)	

4.3.2 Actions dans chaque catégorie

4.3.2.1 Décomposition des actions

Afin d'analyser les vidéos enregistrées, chaque action réalisée par le clinicien a été labélisée pour obtenir la décomposition des actions qu'il a accompli (Voir Tableau 4.5). Certains labels englobent plusieurs actions précises. En effet, les actions « Montrer une partie de la diaphyse », « Montrer une partie de l'articulation » ou encore « Montrer l'ensemble du tibia » ont été regroupé sous le label « Montrer le tibia ». Cette labélisation a été réalisé pour les actions avec la méthode conventionnelle et la réalité virtuelle. Toutes les actions recensées dans le Tableau 4.5 ne sont pas exécutées à chaque cas.

Tableau 4.5 Actions labelisées pour chaque outil

Méthode conventionnelle	Réalité virtuelle
Passer au travers de la coupe	Rotation de la fracture entière
Changement de coupe	
Montrer le tibia	Montrer le tibia
Montrer une approche	Montrer une approche
Montrer un fragment	Montrer un fragment
Montrer le positionnement des plaques et des vis	Montrer le positionnement des plaques et des vis
Rotation de la fracture entière	Montrer la fracture + Montrer un fragment
Passer au travers de la coupe + Montrer un fragment	Essayer de repositionner un fragment
Passer au travers de la coupe + Montrer une approche	Rotation de la fracture entière + Montrer le tibia
Passer au travers de la coupe + Montrer le tibia	
Passer au travers de la coupe + Montrer le positionnement des plaques et des vis	

La Figure 4.1 illustre le découpage qui a été réalisé pour les deux outils pour le cas 5, avec les actions en réalité virtuelle en haut du graphique et les actions avec la visionneuse PACS en bas. Les barres de couleur extérieures représentent les catégories d'explication présentées dans la section précédente tandis que les courbes intérieures illustrent la décomposition des actions faites par le clinicien au cours de ses explications. Chaque couleur représente un type d'action. Pour les deux outils, les actions « Passer au travers de la coupe », « Changement de coupe » et « Rotation de la fracture entière » sont représentés dans la même couleur, ces trois actions ayant pour but de réaliser un changement de point de vue de la fracture. Le détail des couleurs et des actions de chaque outil est illustré à la Figure 4.2.

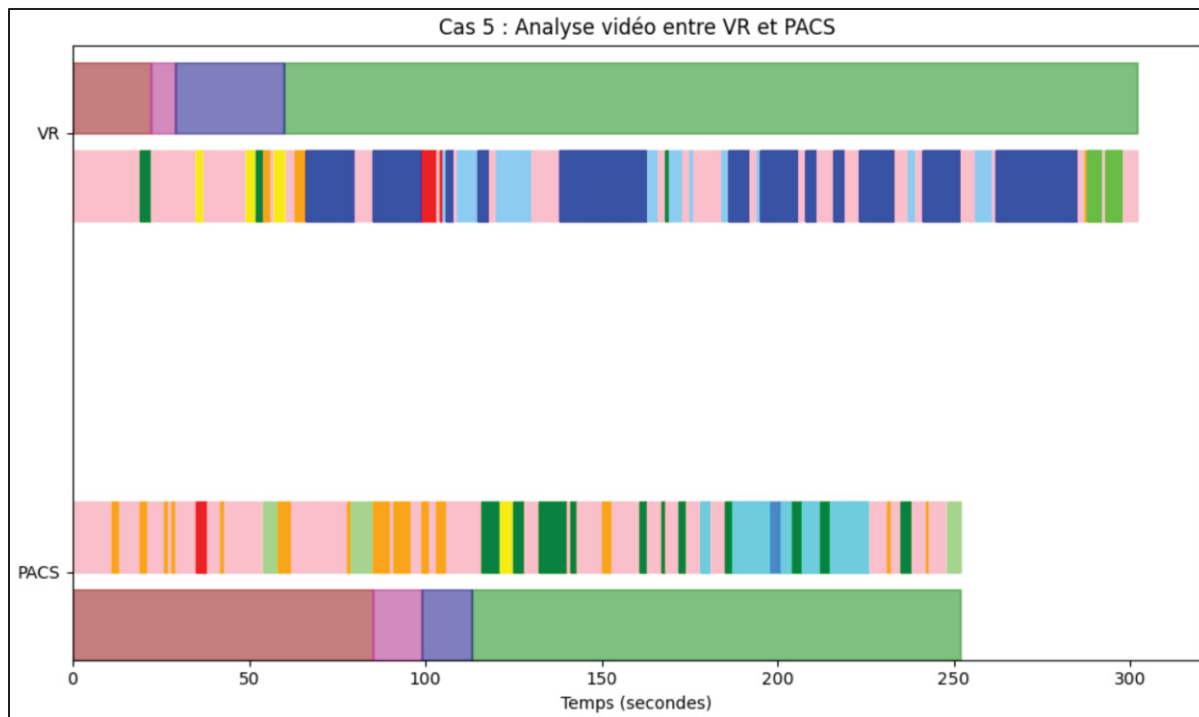


Figure 4.1 Découpage vidéo avec mouvement en réalité virtuelle

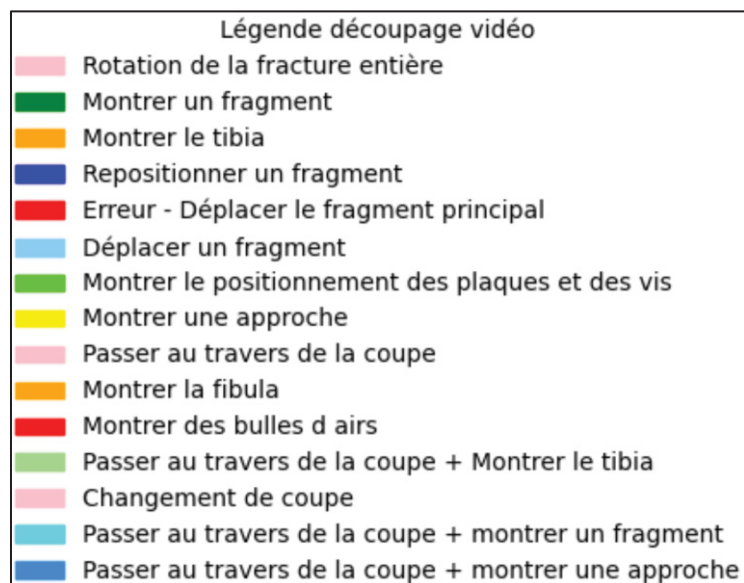


Figure 4.2 Légende du découpage vidéo avec mouvement en réalité virtuelle

4.3.2.2 Comparaison des durées des catégories avec mouvement en réalité virtuelle et sans mouvement en réalité virtuelle

Afin d'avoir une comparaison plus précise des actions réalisées dans les deux outils, deux actions ont été retirées en réalité virtuelle : « Déplacer un fragment » et « Repositionner un fragment ». Ce sont des mouvements qui ne sont pas possibles avec la méthode conventionnelle.

La Figure 4.3 illustre le découpage vidéo réalisé pour le cas 5 en retirant les deux actions citées précédemment pour la réalité virtuelle. Visuellement, la durée du cas 5 est plus courte que celle de la méthode conventionnelle.

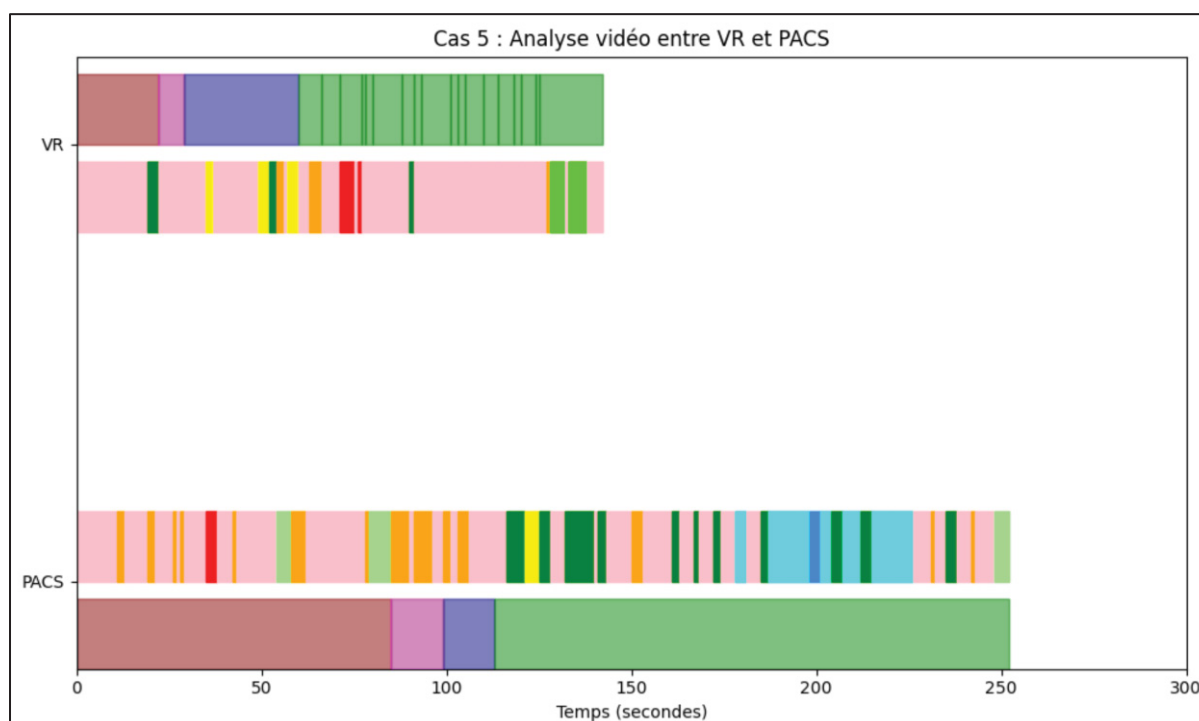


Figure 4.3 Découpage vidéo sans mouvement en réalité virtuelle

Une comparaison a été réalisée entre les durées d'explications de la méthode conventionnelle et celles en réalité virtuelle avec les données réajustées, les résultats sont présentés dans le Tableau 4.6. Pour rappel, la durée moyenne des explications est de 253 (+/- 29) secondes pour la méthode conventionnelle. En réalité virtuelle, cette durée moyenne passe de 322 secondes à

210 (+/- 68) secondes. Il n'y a pas de différence significative sur la durée des explications en enlevant certaines actions en réalité virtuelle par rapport à la méthode conventionnelle (p-value = 0,18).

Tableau 4.6 Durées des explications avec les données réajustées

Outil	Cas 1	Cas 2	Cas 3	Cas 4	Cas 5	Cas 6	Moyenne (+/-)	P-value
PACS	286	222	249	217	269	278	253 (+/- 29)	0,18
RV	205	177	321	258	142	157	210 (+/- 68)	

4.3.2.3 Comparaison des actions pour chaque catégorie

La labélisation a permis de se rendre compte des similitudes au niveau des actions réalisées par le clinicien. Comme mentionné précédemment, certaines actions peuvent être comparées les unes avec les autres, comme « Passer au travers de la coupe » avec la méthode conventionnelle et « Rotation de la fracture entière » en réalité virtuelle. Cependant, pour la plupart des actions avec la méthode conventionnelle, le clinicien réalise plusieurs actions en même temps. Il arrive qu'il effectue l'action « Passer au travers de la coupe » en même temps qu'une autre action comme « Montrer un fragment ». Il est ainsi plus difficile de comparer deux actions qui sont réalisées au même moment que d'autres actions.

Afin de déterminer si les actions réalisées entre les deux outils ont une importance, seuls quatre actions sont analysées : « Montrer le tibia », Montrer une approche », « Montrer un fragment » et « Montrer le positionnement des plaques et des vis ». Le Tableau 4.7 présente le nombre d'actions moyens et la durée moyenne de ces différentes actions.

Tableau 4.7 Nombres et durées des actions pour chaque catégorie

	Moyenne du nombre d'actions (+/-)	P-value du nombre d'actions	Moyenne des durées (sec) (+/-)	P-value de la durée des actions
Montrer le tibia PACS	10,5 (+/- 2,34)	0,003	42 (+/- 15)	0,01
Montrer le tibia VR	5,5 (+/- 2,16)		20 (+/- 11)	
Montrer une approche PACS	2,1 (+/- 0,98)	0,2	12 (+/- 12)	0,3
Montrer une approche VR	3,16 (+/- 1,6)		7 (+/- 2)	
Montrer un fragment PACS	10,16 (+/- 4,07)	0,01	29 (+/- 10)	0,03
Montrer un fragment VR	4,83 (+/- 2,13)		16 (+/- 7)	
Montrer le positionnement des plaques et des vis PACS	1,5 (+/- 1,3)	0,01	10 (+/- 8)	0,3
Montrer le positionnement des plaques et des vis VR	3,83 (+/- 1,47)		15 (+/- 9)	

Comme le montre le Tableau 4.7, il y a une différence significative pour les actions « Montrer le tibia » et « Montrer un fragment » en termes de nombre d'actions et de durée des actions ($p\text{-value} < 0,05$). La réalité virtuelle demande moins de temps et d'actions pour effectuer ces mouvements par rapport à la méthode conventionnelle.

Il y a également une différence significative sur le nombre de fois où l'action « Montrer le positionnement des plaques et des vis » a été réalisée ($p\text{-value} < 0,05$). Cependant, cette action n'a pas été effectuée à chaque cas dans les deux outils, cette action reste donc compliquée à comparer.

4.4 Analyse des questionnaires d'utilisabilité standard

Deux questionnaires d'utilisabilité standard ont été posé au participant.

4.4.1 System Usability Scale

Le participant a rempli ce premier questionnaire à la fin des deux parties de l'étude usager. Les scores de chaque questionnaire est représenté dans le tableau suivant, avec les scores d'utilisabilité de chaque questionnaire (Voir Tableau 4.8).

Tableau 4.8 SUS : Score de chaque questionnaire répondu par le participant

System Usability Scale	PACS	RV
Je pense que j'aimerais utiliser cet outil fréquemment.	6	10
J'ai trouvé l'outil inutilement complexe.	4	2
Je pense que l'outil est facile à utiliser.	4	4
Je pense que j'aurais besoin de l'aide d'une personne technique pour pouvoir utiliser cet outil.	2	2
J'ai trouvé que les différentes fonctions de l'outil étaient bien intégrées.	4	9
J'ai trouvé qu'il y avait trop d'incohérences dans cet outil.	3	1
J'imagine que la plupart des gens apprendront à utiliser cet outil très rapidement.	8	9
J'ai trouvé l'outil très lourd à utiliser.	3	2
Je me suis senti très à l'aise dans l'utilisation de l'outil.	8	3
J'ai dû apprendre beaucoup de choses avant de pouvoir utiliser cet outil.	3	7
Score	65	72,5

Le score d'utilisabilité en réalité virtuelle est de 72,5, ce score est supérieur à 70, ce qui est considéré comme un bon score d'utilisabilité ; contrairement à la visionneuse PACS qui est en dessous de 70.

4.4.2 NASA-TLX

Le participant a également rempli ce deuxième questionnaire à la fin des deux parties de l'étude, ce questionnaire étudiant la charge de travail des outils utilisés. Le Tableau 4.9 montre les réponses données par le participant pour les deux outils étudiés.

Tableau 4.9 NASA-TLX : Réponses du questionnaire par le participant pour les deux outils

NASA-TLX	PACS	RV
Dans quelle mesure cette tâche était-elle exigeante sur le plan mental ?	8	1
Dans quelle mesure cette tâche était-elle exigeante sur le plan physique ?	1	1
Dans quelle mesure le rythme de la tâche était-il rapide ou précipité ?	2	3
Dans quelle mesure avez-vous réussi à accomplir ce que l'on vous demandait de faire ?	6	9
Quels efforts avez-vous dû fournir pour atteindre votre niveau de performance ?	4	7
Dans quelle mesure avez-vous été peu sûr de vous, découragé, irrité, stressé et ennuyé ?	5	3
Moyenne	26	24

Les résultats obtenus sont de 26 pour la méthode conventionnelle utilisant la visionneuse PACS et de 24 pour la réalité virtuelle.

Dans le détail des questions, la charge mentale employée par le chirurgien est supérieure avec la méthode conventionnelle par rapport à la réalité virtuelle.

CHAPITRE 5

DISCUSSION

Dans le cadre de l'étude usager, le protocole de réflexion à haute voix a permis de comparer une méthode conventionnelle d'enseignement avec un outil préliminaire en réalité virtuelle pour en comprendre le processus. Dans les sections suivantes, une discussion sera menée sur les différents résultats présentés.

5.1 Discussion globale sur les enregistrements

Selon les résultats obtenus par les analyses précédentes, il n'y a pas de différence significative entre les durées globales des enregistrements bien que dans la globalité, les explications données par le chirurgien sont plus courtes avec la méthode conventionnelle par rapport à la réalité virtuelle. Ce résultat peut provenir du fait que le chirurgien est habitué à l'utilisation de la visionneuse PACS et qu'il réalise ses planifications ainsi que ses formations avec cet outil. Le chirurgien n'est pas familier avec la réalité virtuelle, ce qui a pu lui prendre un temps d'adaptation et de compréhension des comportements possibles dans l'environnement virtuel. En particulier, la compréhension des distances a facilité la prise en main de l'outil en réalité virtuelle. Bien que le chirurgien se soit entraîné avant d'étudier les cas de fractures, il a eu des difficultés à assimiler les notions de distances avec les objets 3D présents dans l'environnement virtuel. La fracture était trop agrandie et trop loin, ce qui rendait laborieux les interactions. Il a été nécessaire de réexpliquer que plus les objets 3D sont petits et proches, plus il est facile de les manipuler. L'ajout de plusieurs éléments de décor dans l'environnement virtuel pourrait permettre d'obtenir des indices de profondeur et ainsi améliorer la perception de la distance et de la taille d'un objet plus proche par rapport à un objet plus loin (Vienne et al., 2020).

La différence de temps pris en réalité virtuelle avec ou sans mouvement montre qu'en terme d'explication de la chirurgie, la formation est en moyenne plus courte en réalité virtuelle qu'avec la méthode conventionnelle. Cela s'explique par des moments où le chirurgien prend le temps d'essayer de replacer le plus anatomiquement possible les fragments osseux du tibia.

La formation en réalité virtuelle permet donc l'enseignement sans ajouter un délai dans les explications fournies.

5.2 Discussion sur l'analyse des transcriptions

L'analyse des transcriptions a permis de se rendre compte que les mêmes processus ont bien été définis dans les deux outils. En effet, la forme et le fond des explications globales ont été identiques pour la méthode conventionnelle ainsi que pour la réalité virtuelle.

Il est cependant à noter qu'en réalité virtuelle, trois cas segmentés étaient incorrects, ce qui pose un problème de fiabilité dans la segmentation réalisée. Toutes les segmentations ont été réalisées manuellement, puis ont été revues et validées par le chirurgien. De plus, toutes les fractures étudiées dans ce projet sont des fractures qui ont été opérées par ce même chirurgien. Cependant, cette vérification n'a pas été réalisée dans le cadre d'un enseignement. La validation de la segmentation a seulement été visuelle et aucun modèle 3D osseux n'a été déplacé ou repositionné pour être sûr que la segmentation était bien faite. De plus, il n'y a pas eu de superposition ou de vérification avec les images tomodensitométriques initiales. La segmentation a été validée visuellement sans examiner les tomodensitométries des cas. Dans deux cas, la malléole médiale était encore attachée à la diaphyse qui est le morceau principal. Or, la malléole médiale devrait être détachée. Cela n'a pas empêché le chirurgien de comprendre le détachement et de déterminer le type de fracture. Dans le dernier cas, il y a un fragment osseux qui a été représenté qui ne fait pas parti du tibia. Il appartient en fait à l'os en dessous et s'est retrouvé à l'intérieur du tibia avec la fracture. Ce fragment osseux est également visible sur les tomodensitométries mais rien n'indique qu'il ne fait pas partie du tibia. Lors de la reconstruction en réalité virtuelle, le chirurgien s'est rendu compte que ce fragment osseux ne pouvait pas être replacé sur le tibia. Il a confirmé qu'il a enlevé ce fragment osseux pour le replacer sur le bon os lors de la chirurgie effectuée sur ce patient. Ces constatations amènent la question de la segmentation automatisée qui pourrait permettre une meilleure segmentation des os.

Pour pallier une segmentation mal réalisée, il serait également intéressant d'ajouter une fonctionnalité pour découper la segmentation déjà réalisée. Le chirurgien pourra la rectifier en cas de mauvaise segmentation et l'améliorer. Cette rectification pourrait s'appuyer sur les images tomodensitométriques visualisables en parallèle de la segmentation.

Le dernier cas mal segmenté suggère cependant que la réalité virtuelle a permis une meilleure visualisation de la fracture du tibia distal en réalité virtuelle par rapport à la méthode conventionnelle. En effet, lors de l'enseignement avec la méthode conventionnelle, le chirurgien n'a pas pu se rendre compte des différents fragments osseux qui composaient la fracture. Il n'a pu que faire des suppositions sur le positionnement des fragments en se basant sur leur forme et la structure de la fracture. En réalité virtuelle, le repositionnement des fragments osseux a permis d'identifier un fragment en trop qui ne fait pas parti du tibia distal.

L'analyse du nombre de mots employés dans chaque phase du processus montre qu'il y a une différence significative entre la méthode conventionnelle et la réalité virtuelle pour les explications de la phase de détermination du type de fracture. Ces résultats montrent que l'outil en réalité virtuelle est plus visuel que la méthode conventionnelle, puisqu'il requiert moins de mots.

De plus, la réduction du nombre de mots en réalité virtuelle suggèrent qu'il pourrait y avoir une interaction plus simple et directe qu'avec la méthode conventionnelle. En effet, avec la méthode conventionnelle, le chirurgien passe par les trois orientations de l'image médicale en commençant par la coupe axiale. Il vérifie ensuite les observations qu'il a faites avec les coupes coronales et sagittales. En réalité virtuelle, le chirurgien pivote la fracture étudiée pour déterminer le type de fracture sans avoir besoin de confirmer avec d'autres outils.

5.3 Discussion sur l'analyse vidéo

Les vidéos enregistrées ont été analysées afin de comparer les actions avec les transcriptions. Il apparaît que les mouvements réalisés sont en accord avec les transcriptions.

Au niveau de la décomposition des actions, certaines actions ne sont pas comparables. Avec la méthode conventionnelle, l'action principale est de « Passer au travers de la coupe », pour les coupes axiales, sagittales et coronales. Cependant, cette action peut être jumelée avec d'autres actions, ce qui empêche la comparaison de cette action avec celle de « Rotation de la fracture entière » effectuée en réalité virtuelle. En réalité virtuelle, le chirurgien effectue les actions individuellement.

Pour les actions identiques dans les deux outils, il y a une différence significative pour « Montrer le tibia » ou « Montrer un fragment ». Cette différence peut être expliquée par le fait qu'en réalité virtuelle, les fragments osseux sont directement manipulés par rapport à la méthode conventionnelle, où les fragments ne peuvent qu'être montrés à l'écran.

5.4 Discussion sur les questionnaires d'utilisabilité standard

Les résultats du questionnaires SUS ont montré que la réalité virtuelle avait une meilleure utilisabilité que la méthode conventionnelle. Le fait que la visionneuse PACS ait un score de 65 indique que l'outil pourrait être amélioré pour l'expérience utilisateur. La réalité virtuelle a eu un score de 72,5 qui est un bon score d'utilisabilité. L'outil permet une assez bonne expérience utilisateur, mais peut néanmoins être amélioré.

Le score obtenu en réalité virtuelle est supérieur à celui de la méthode conventionnelle. Cela suggère que l'outil en réalité virtuelle est exploitable pour une utilisation par les résidents ou d'autres chirurgiens orthopédistes sans nuire à la formation prodiguée par les chirurgiens.

Concernant le questionnaire NASA-TLX, les résultats montrent qu'il n'y a pas de différence entre les deux outils évalués. La méthode conventionnelle présente un résultat légèrement supérieur à celui en réalité virtuelle mais la différence n'est pas conséquente. Bien que la charge mentale soit inférieure en réalité virtuelle, elle ne permet de pallier les autres échelles

étudiées. Ce questionnaire permet également de voir que l'outil en réalité virtuelle n'offre pas une charge de travail supérieur à celle de la méthode conventionnelle.

5.5 Discussion sur l'outil développé

L'outil développé en réalité virtuelle a permis la visualisation de six cas segmentés de fractures du tibia distal et la manipulation des fragments osseux dans le cadre d'une formation pour les résidents en orthopédie traumatologie. À l'aide de cet outil, le chirurgien a réalisé des actions qui ne sont pas possible avec la méthode conventionnelle de formation telle que le déplacement des fragments osseux.

Après discussion avec le chirurgien, certaines améliorations de l'outil peuvent être ajoutée. Tout d'abord, il serait intéressant d'ajouter des repères spatiaux autour de l'os fracturé : antérieur, postérieur, latéral, médial. Ces repères peuvent être représentés de la même manière que la vue 3D du logiciel 3D Slicer (Voir Figure 5.1). Durant l'étude usager, le chirurgien a eu du mal à se repérer spatialement et à savoir si le fragment sélectionné était à la bonne place. Il utilisait principalement ces connaissances de l'anatomie de l'os tibial ou la position de la malléole médiale pour repérer les autres fragments osseux.

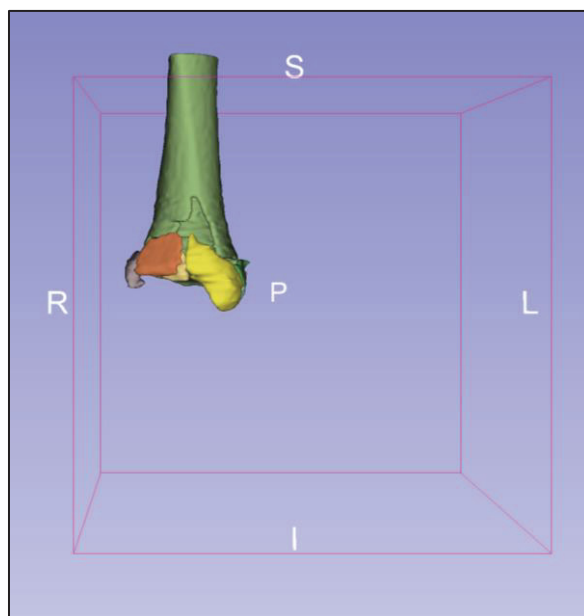


Figure 5.1 Repère spatiaux dans la vue 3D de 3D Slicer

Afin d'avoir d'autres repères spatiaux, l'ajout des tomodensitométries dans l'outil de réalité virtuelle permettrait aux utilisateurs de faire correspondre les fragments osseux déplacé par rapport à ce qui est vu de manière conventionnelle.

La segmentation réalisée pour les différents cas d'étude n'a représenté que la partie osseuse du tibia et non l'ensemble du membre inférieur. Elle a été faite ainsi pour se concentrer sur la forme du tibia fracturé et comprendre sa structure anatomique. Cependant, il serait intéressant d'ajouter d'autres éléments à cette segmentation, comme la fibula ou les tissus mous qui englobent le tibia. Cela permettrait d'avoir une vision plus globale de la cheville et de pouvoir comprendre les étapes de la réduction de fracture.

Au niveau du changement d'orientation des fragments osseux, il serait pertinent de pouvoir bouger les fragments osseux avec les joysticks des manettes de réalité virtuelle. Durant l'étude usager, le chirurgien a rencontré des difficultés à comprendre comment réaliser le mouvement de rotation pour pivoter un fragment sélectionné.

Enfin, l'ajout de vis et de plaques modélisé en trois dimensions aiderait à améliorer la procédure d'enseignement de la chirurgie. Le placement des vis et plaques sur la fracture du tibia distal une fois réduite pourrait permettre aux résidents de mieux comprendre la réduction dans son ensemble.

CHAPITRE 6

LIMITES

Cette étude a présenté plusieurs limitations. Tout d'abord, concernant les participants et les données utilisées dans le cadre de cette étude. Il n'y avait qu'un seul participant à cette étude, qui était le chirurgien orthopédique ayant opéré les cas d'étude évalué durant ce mémoire. De ce fait, il peut y avoir un biais sur les résultats à cause de la collaboration du chirurgien dans le projet. Le chirurgien pourrait être moins critique afin d'influencer positivement les résultats.

De plus, les cas d'étude ont été limités à six, l'idéal aurait été d'avoir une plus grande quantité de données. Cela s'explique par le fait que les cas de fractures du tibia distal restent assez rares et que les données ne proviennent que d'un seul centre hospitalier.

Le temps étudié dans ce projet ne concerne que le temps alloué à l'enseignement de réduction de fracture. Cependant, la segmentation manuelle réalisée pour obtenir les modèles tridimensionnels doit être prise en compte dans le temps global du projet. En effet, la segmentation manuelle prend un certain temps à être réalisée, qui peut être conséquent en ayant plusieurs dizaines de cas. Une personne autre que le chirurgien doit segmenter tous les cas avant qu'ils ne soient étudiés par le chirurgien. Ainsi, il faut prendre en compte cette ressource supplémentaire dans le projet.

Enfin, les questionnaires d'utilisabilité employés dans le cadre de cette étude sont des questionnaires standards qui ne correspondent pas spécifiquement aux besoins de l'étude. Afin d'obtenir des résultats plus précis, il serait intéressant de personnaliser les questionnaires en fonction des variables qu'on veut interroger.

CONCLUSION

L'objectif principal de ce mémoire était d'évaluer l'intérêt d'utiliser un outil de réalité virtuelle dans la formation de la chirurgie de réduction du tibia distal afin de vérifier sa faisabilité. Afin de réaliser cet objectif, un outil de visualisation en réalité virtuelle a été développé pour observer des fractures du tibia distal et qu'elles soient manipulable dans un environnement virtuel.

Une étude usager a été réalisée afin de valider l'usage de cet outil par rapport à la méthode conventionnelle utilisées par les chirurgiens. En utilisant un protocole de réflexion à haute voix, les transcriptions ont permis de valider que l'outil de réalité virtuelle possède des similitudes avec la méthode conventionnelle. Les résultats de l'étude ont indiqué que la réalité virtuelle pourrait être un outil qui aiderait les chirurgiens à enseigner la réduction de fracture tout en visualisant la structure osseuse du tibia.

Le manque de cas d'étude et de participant sont des limites à prendre en compte pour des études prospectives. La participation de chirurgiens expérimentés ainsi que de résidents novices permettrait d'avoir un plus large éventail d'expertise pour améliorer l'outil développé en réalité virtuelle.

RECOMMANDATIONS

À la suite de cette étude, des recommandations pour des études futures peuvent être faites, afin de pallier les limites présentées dans ce mémoire.

Comme mentionné dans la section « Limites », le fait que le seul participant à l'étude soit le chirurgien qui fournit les données peut mener à un biais à cause de la collaboration étroite du chirurgien dans le projet. Afin de pallier ce biais, il serait pertinent d'intégrer d'autres chirurgiens orthopédiques spécialisés en cheville, ou alors des résidents en orthopédiques, étant des potentiels destinataires de l'outil. De même pour le nombre de cas étudiés dans cette étude, il serait intéressant de pouvoir étudié un plus grand nombre de cas de fracture du tibia distal. Pour cela, une étude multicentrique pourrait permettre de récupérer des données tomodensitométriques de plusieurs patients provenant de différents hôpitaux et proposer aux chirurgiens orthopédiques de ces différents centres de participer à une étude prospective.

De plus, la segmentation reste une problématique dans le cadre de la visualisation tridimensionnelle de données. Une possibilité serait d'approfondir la segmentation automatisée afin d'obtenir des modèles tridimensionnels de manière plus rapide et moins gourmande en temps.

Plus largement, il serait intéressant de pouvoir visualiser et intégrer les tissus mous à la fracture afin d'avoir une visualisation plus complète de la fracture entière.

Enfin, comme mentionné dans la section « Discussion », les améliorations de l'outil de visualisation pourraient mener à un approfondissement des connaissances de la chirurgie de réduction de fracture, et le développement de l'outil pourrait à terme servir d'outil de formation pour les orthopédistes.

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Akhtar, K., Sugand, K., Sperrin, M., Cobb, J., Standfield, N., & Gupte, C. (2015). Training safer orthopedic surgeons : Construct validation of a virtual-reality simulator for hip fracture surgery. *Acta Orthopaedica*, 86(5), 616-621.
<https://doi.org/10.3109/17453674.2015.1041083>
- Ankle Fractures (Broken Ankle)—OrthoInfo—AAOS*. (s. d.). Consulté 20 janvier 2025, à l'adresse <https://www.orthoinfo.org/en/diseases--conditions/ankle-fractures-broken-ankle/>
- Bastias, C., & Lagos, L. (2020). New Principles in Pilon Fracture Management. *Foot and Ankle Clinics*, 25(4), 505-521. <https://doi.org/10.1016/j.fcl.2020.08.004>
- Blumstein, G., Zukotynski, B., Cevallos, N., Ishmael, C., Zoller, S., Burke, Z., Clarkson, S., Park, H., Bernthal, N., & SooHoo, N. F. (2020). Randomized Trial of a Virtual Reality Tool to Teach Surgical Technique for Tibial Shaft Fracture Intramedullary Nailing. *Journal of Surgical Education*, 77(4), 969-977.
<https://doi.org/10.1016/j.jsurg.2020.01.002>
- Blyth, P., Stott, N. S., & Anderson, I. A. (2007). A simulation-based training system for hip fracture fixation for use within the hospital environment. *Injury*, 38(10), 1197-1203.
<https://doi.org/10.1016/j.injury.2007.03.031>
- Brooke, J. (1996). *SUS - A quick and dirty usability scale*.
- Byers, J. C., Bittner, A. C., & Hill, S. G. (1989). *Traditional and raw task load index (TLX) correlations : Are paired comparisons necessary?*

- Carter, T. H., Duckworth, A. D., Oliver, W. M., Molyneux, S. G., Amin, A. K., & White, T. O. (2019). Open Reduction and Internal Fixation of Distal Tibial Pilon Fractures. *JBJS Essential Surgical Techniques*, 9(3), e29. <https://doi.org/10.2106/JBJS.ST.18.00093>
- Colcuc, C., Miersbach, M., Cienfuegos, M., Grüneweller, N., Vordemvenne, T., & Wähnert, D. (2024). Comparison of virtual reality and computed tomography in the preoperative planning of complex tibial plateau fractures. *Archives of Orthopaedic and Trauma Surgery*. <https://doi.org/10.1007/s00402-024-05348-9>
- De Morais, F., Schaab, B., & Jaques, P. (2017). The think aloud method for qualitative evaluation of an intelligent tutoring system interface. *2017 Twelfth Latin American Conference on Learning Technologies (LACLO)*, 1-8. <https://doi.org/10.1109/LACLO.2017.8120904>
- Fedorov, A., Beichel, R., Kalpathy-Cramer, J., Finet, J., Fillion-Robin, J.-C., Pujol, S., Bauer, C., Jennings, D., Fennessy, F., Sonka, M., Buatti, J., Aylward, S., Miller, J. V., Pieper, S., & Kikinis, R. (2012). 3D Slicer as an image computing platform for the Quantitative Imaging Network. *Magnetic Resonance Imaging*, 30(9), 1323-1341. <https://doi.org/10.1016/j.mri.2012.05.001>
- Grose, A., Gardner, M. J., Hettrich, C., Fishman, F., Lorch, D. G., Asprinio, D. E., & Helfet, D. L. (2007). Open Reduction and Internal Fixation of Tibial Pilon Fractures Using a Lateral Approach. *Journal of Orthopaedic Trauma*, 21(8), 530-537. <https://doi.org/10.1097/BOT.0b013e318145a227>
- Hart, S. G., & Field, M. (s. d.). *NASA-TASK LOAD INDEX (NASA-TLX); 20 YEARS LATER*.

- Jaspers, M., Steen, T., Bos, C., & Geenen, M. (2004). The think aloud method : A guide to user interface design. *International Journal of Medical Informatics*, 73(11-12), 781-795. <https://doi.org/10.1016/j.ijmedinf.2004.08.003>
- Jiménez-Delgado, J., Calzado-Martínez, A., Pérez-Cano, F., & Luque-Luque, A. (2020). Virtual Reality Environment for the Validation of Bone Fracture Reduction Processes: *Proceedings of the 15th International Joint Conference on Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and Applications*, 399-405. <https://doi.org/10.5220/0009175003990405>
- Joveniaux, P., Ohl, X., Harisboure, A., Berrichi, A., Labatut, L., Simon, P., Mainard, D., Vix, N., & Dehoux, E. (2010). Distal tibia fractures : Management and complications of 101 cases. *International Orthopaedics*, 34(4), 583-588. <https://doi.org/10.1007/s00264-009-0832-z>
- Korkmaz, A., Çiftçdemir, M., Özcan, M., Çopuroğlu, C., & Saridoğan, K. (2013). The analysis of the variables, affecting outcome in surgically treated tibia pilon fractured patients. *Injury*, 44(10), 1270-1274. <https://doi.org/10.1016/j.injury.2013.06.016>
- Lamb, A., McKinney, B., Frousiakis, P., Diaz, G., & Sweet, S. (2023). A Comparative Study of Traditional Technique Guide versus Virtual Reality in Orthopedic Trauma Training. *Advances in Medical Education and Practice, Volume 14*, 947-955. <https://doi.org/10.2147/AMEP.S395087>
- Lewis, G. S., Wee, H., Vicory, J., Armstrong, A. D., & Reid, J. S. (2022). Virtual Simulation for Interactive Visualization of 3D Fracture Fixation Biomechanics. *Journal of the American Academy of Orthopaedic Surgeons*, 30(1), e51-e58. <https://doi.org/10.5435/JAAOS-D-20-01322>

- Luque-Luque, A., Pérez-Cano, F. D., & Jiménez-Delgado, J. J. (2021). Complex fracture reduction by exact identification of the fracture zone. *Medical Image Analysis*, 72, 102120. <https://doi.org/10.1016/j.media.2021.102120>
- Mair, O., Pflüger, P., Hoffeld, K., Braun, K. F., Kirchhoff, C., Biberthaler, P., & Crönlein, M. (2021). Management of Pilon Fractures—Current Concepts. *Frontiers in Surgery*, 8, 764232. <https://doi.org/10.3389/fsurg.2021.764232>
- Marchand, L. S., & Sciadini, M. F. (2020). Simulation Training in Fracture Surgery. *Journal of the American Academy of Orthopaedic Surgeons*, 28(21), e939-e947. <https://doi.org/10.5435/JAAOS-D-20-00076>
- Marieb, E. N., & Hoehn, K. (2010). *Anatomie et physiologie humaines* (4e éd). Éditions du Renouveau pédagogique; WorldCat.
- McKinney, B., Dbeis, A., Lamb, A., Frousiakis, P., & Sweet, S. (2022). Virtual Reality Training in Unicompartmental Knee Arthroplasty : A Randomized, Blinded Trial. *Journal of Surgical Education*, 79(6), 1526-1535. <https://doi.org/10.1016/j.jsurg.2022.06.008>
- Meinberg, E., Agel, J., Roberts, C., Karam, M., & Kellam, J. (2018). Fracture and Dislocation Classification Compendium—2018. *Journal of Orthopaedic Trauma*, 32(1), S1-S10. <https://doi.org/10.1097/BOT.0000000000001063>
- Müller, F. J., & Nerlich, M. (2010). *Zlomenina pylonu tibie*.
- Negrillo-Cárdenas, J., Jiménez-Pérez, J.-R., Madeira, J., & Feito, F. R. (2022). A virtual reality simulator for training the surgical reduction of patient-specific supracondylar humerus fractures. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, 17(1), 65-73. <https://doi.org/10.1007/s11548-021-02470-6>

- ORIF - Plate and screws through anterolateral approach for Complete, multifragmentary articular and metaphyseal fracture.* (s. d.). AO Surgery Reference. Consulté 15 janvier 2025, à l'adresse <https://surgeryreference.aofoundation.org/orthopedic-trauma/adult-trauma/distal-tibia/complete-multifragmentary-articular-and-metaphyseal-fracture/orif-plate-and-screws-through-anterolateral-approach>
- Orn, A. (2023, juin 26). *Everything You Need to Know About the NASA-TLX - Research Collective.* <https://research-collective.com/everything-you-need-to-know-about-the-nasa-tlx/>
- Paxton, N. C., Wilkinson, B. G., Fitzpatrick, D., Owen, E. C., Luposchainsky, S., & Dalton, P. D. (2023). Technical improvements in preparing 3D printed anatomical models for comminuted fracture preoperative planning. *3D Printing in Medicine*, 9(1), 25. <https://doi.org/10.1186/s41205-023-00189-5>
- Rotter, R., & Gierer, P. (2017). Operationstechnik und deren Ergebnisse der Pilon-tibiale-Fraktur. *Der Unfallchirurg*, 120(8), 652-657. <https://doi.org/10.1007/s00113-017-0371-9>
- Solomon, P. (1995). The think aloud method: A practical guide to modelling cognitive processes. *Information Processing & Management*, 31(6), 906-907. [https://doi.org/10.1016/0306-4573\(95\)90031-4](https://doi.org/10.1016/0306-4573(95)90031-4)
- Stirling, E. R., Lewis, T. L., & Ferran, N. A. (2014). Surgical skills simulation in trauma and orthopaedic training. *Journal of Orthopaedic Surgery and Research*, 9(1), 126. <https://doi.org/10.1186/s13018-014-0126-z>

- Strickland, N. H. (2000). Current topic : PACS (picture archiving and communication systems): filmless radiology. *Archives of Disease in Childhood*, 83(1), 82-86. <https://doi.org/10.1136/adc.83.1.82>
- Sugand, K., Akhtar, K., Khatri, C., Cobb, J., & Gupte, C. (2015). Training effect of a virtual reality haptics-enabled dynamic hip screw simulator : A randomized controlled trial. *Acta Orthopaedica*, 86(6), 695-701. <https://doi.org/10.3109/17453674.2015.1071111>
- Teeny, S., & Wiss, D. (1993). *Open Reduction and Internal Fixation of Tibial Plafond Fractures*. 292.
- Vaughan, N., Dubey, V. N., Wainwright, T. W., & Middleton, R. G. (2016). A review of virtual reality based training simulators for orthopaedic surgery. *Medical Engineering & Physics*, 38(2), 59-71. <https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2015.11.021>
- Vienne, C., Masfrand, S., Bourdin, C., & Vercher, J.-L. (2020). Depth Perception in Virtual Reality Systems : Effect of Screen Distance, Environment Richness and Display Factors. *IEEE Access*, 8, 29099-29110. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2972122>
- Yehyaw, T. M., Thomas, T. P., Ohrt, G. T., Marsh, J. L., Karam, M. D., Brown, T. D., & Anderson, D. D. (2013). A Simulation Trainer for Complex Articular Fracture Surgery. *Journal of Bone and Joint Surgery*, 95(13), e92. <https://doi.org/10.2106/JBJS.L.00554>

